

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Lukáš Jícha

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Návrh a realizace nízkonákladového systému pro měření vybraných  
parametrů v dopravním provozu

Design and Implementation of a Low-Cost System for Measurement  
of Selected Traffic Parameters

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Lukáš Jícha**

Studijní program:

B0714A150001 Řídící a informační systémy

Téma:

Návrh a realizace nízkonákladového systému pro měření vybraných parametrů v dopravním provozu  
Design and Implementation of a Low-Cost System for Measurement of Selected Traffic Parameters

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Bakalářská práce se zaměřuje na návrh a realizaci nízkonákladového systému pro měření vybraných parametrů v dopravním provozu (např. detekce průjezdů, obsazenost dopravního proudu v jednotlivých jízdních pružích, klasifikace vozidel apod.) Budou využity pneumatické senzory, které jsou vyvíjeny v rámci odborné skupiny MĚŘENÍ A SENZORY. Práce se věnuje klasifikaci a popisu vybraných neintrusivních detektorů (např. ultrazvukové detektory, mikrovlnné radary, infračervené detektory, video-detekce apod.) Cílem bakalářské práce je otestování navržených senzorů v reálném provozu (např. silniční doprava, železniční doprava, tramvajová doprava apod.) Na základě realizovaných experimentů budou stanoveny statistické parametry dopravního provozu a přesnost navržených senzorů vůči relevantní referenci.

Postup řešení:

1. Literární rešerše současného stavu problematiky měření vybraných parametrů v dopravním provozu (intenzita, přítomnost, rychlost apod.) Klasifikace a rozbor technologie neintrusivních dopravních detektorů (pasivní detektory hluku (zvuku), ultrazvukové detektory, mikrovlnné radary, aktivní infračervené detektory, pasivní infračervené detektory, kombinované detektory, video-detekce (zpracování obrazu). Porovnání jednotlivých senzorů.
2. Návrh a realizace nízkonákladového systému pro měření vybraných parametrů v dopravním provozu (např. detekce průjezdů, obsazenost dopravního proudu v jednotlivých jízdních pružích, klasifikace vozidel apod.)
3. Návrh a realizace experimentů pro ověření funkčnosti navržených senzorů v reálném provozu (silniční doprava, železniční doprava, tramvajová doprava apod.) Návrh aplikace pro relevantní verifikaci funkčnosti (např. na základě manuálního počítání, pomocí světelná závory apod.)
4. Statistické zpracování dosažených výsledků.
5. Diskuze dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRUNA, Jiří. *Studie provozuschopnosti silniční sítě s využitím telematických přístupů*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, Ústav managementu.
- [2] SILOVSKÁ, Jana. *Limity přístrojů určených k zaznamenávání vozidel a měření jejich rychlosti*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Výpočetní informační centrum.

- [3] PŘIBYL, Ondřej. *Neintrusivní dopravní detektory. Měření a zpracování dat (MDS)*. Praha, 2016. Přednáška. ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, Ústav aplikované matematiky.
- [4] KEPÁK, Stanislav. *Nový monitor dopravního provozu na bázi optovláknového interferometru* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2019-10-16]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/127351>. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [5] MINGE, Erik, Jerry KOTZENMACHER a Scott PETERSON. *Evaluation of non-intrusive technologies for traffic detection*. Technical Report Documentation, No. MN/RC 2010-36. Saint Paul, MN: Minnesota Department of Transportation, Research Services Section.
- [6] KOTZENMACHER, Jerry, Erik MINGE a Bingwen HAO. *Evaluation of Portable Non-Intrusive Traffic Detection System*. Technical Report Documentation, No. MN-RC-2005-37. St. Paul, Minnesota: Minnesota Department of Transportation, Research Services Section.
- [7] GUERRERO-IBÁÑEZ, Juan, Sherali ZEADALLY a Juan CONTRERAS-CASTILLO. Sensor technologies for intelligent transportation systems. *Sensors*, 2018. 18(4), 1212. ISSN 1424-8220. DOI: 10.3390/s18041212.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Radek Martinek, Ph.D.**


Konzultant bakalářské práce: Ing. Jakub Kolařík

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020



  
doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 15.05.2020



.....  
Podpis studenta

## **Poděkování**

Tato práce vznikla za podpory projektu Platforma pro výzkum orientovaný na Průmysl 4.0 a robotiku v ostravské aglomeraci, CZ.02.1.01/0.0/0.0/17\_049/0008425 financovaného z EFRR.

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Radkovi Martinkovi, Ph.D. a panu Ing. Jakubovi Kolaříkovi za odbornou pomoc, konzultaci a řešení problematiky při vytvoření této bakalářské práce.

## Abstrakt

Bakalářská práce se zaměřuje na návrh a realizaci nízkonákladového systému pro měření vybraných parametrů v dopravním provozu (např. detekce průjezdů, obsazenost dopravního proudu v jednotlivých jízdních pruzích, klasifikace vozidel apod.). Budou využity pneumatické senzory, které jsou vyvíjeny v rámci odborné skupiny MĚŘENÍ A SENZORY. Práce se věnuje klasifikaci a popisu vybraných neintrusivních detektorů (např. ultrazvukové detektory, mikrovlnné radary, infračervené detektory, video-detekce apod.) Cílem bakalářské práce je otestování navržených senzorů v reálném provozu (např. silniční doprava, železniční doprava, tramvajová doprava apod.). Na základě realizovaných experimentů budou stanoveny statistické parametry dopravního provozu a přesnost navržených senzorů vůči relevantní referenci.

**Klíčová slova:** měření parametrů v dopravním provozu, pneumatické senzory, klasifikace a popis neintrusivních detektorů, otestování senzorů v provozu, statistické parametry, přesnost senzorů.

## Abstract

The bachelor thesis focuses on the design and implementation of low-cost system for measurement of selected parameters in traffic (eg detection of passages, traffic flow occupancy in individual lanes, vehicle classification etc.) Pneumatic sensors developed within the MEASURING AND SENSORS expert group will be used. The thesis deals with classification and description of selected non-intrusive detectors (eg ultrasonic detectors, microwave radars, infrared detectors, video-detection etc.). The aim of this thesis is to test designed sensors in real traffic (eg road transport, rail transport, tram transport, etc.). Based on realized experiments will be determined statistical parameters of traffic and accuracy of designed sensors against relevant reference.

**Key words:** measurement of traffic parameters, pneumatic sensors, classification and description of non-intrusive detectors, testing of traffic sensors, statistical parameters, accuracy of sensors.

# Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	10
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	11
1 Úvod.....	13
2 Charakteristika dopravního provozu .....	14
2.1 Základní charakteristické veličiny.....	14
2.1.1 Intenzita dopravního proudu .....	14
2.1.2 Hustota dopravního proudu .....	15
2.1.3 Rychlost dopravního proudu .....	16
2.2 Vztahy mezi veličinami.....	16
2.2.1 Vztah intenzity, hustoty a rychlosti .....	16
2.2.2 Vztah mezi intenzitou a hustotou v dopravním provozu.....	17
2.2.3 Vztah mezi rychlostí a hustotou v dopravním provozu.....	17
2.2.4 Vztah mezi rychlostí a intenzitou v dopravním provozu.....	18
3 Neintrusivní detektory.....	19
3.1 Pasivní detektory hluku (zvuku) .....	19
3.1.1 Pasivní detektor hluku SAS-1 .....	20
3.2 Ultrazvukové detektory .....	22
3.2.1 Ultrazvukový detektor T30 .....	23
3.3 Mikrovlnné detektory .....	23
3.3.1 Provedení.....	24
3.3.2 Výhody a nevýhody .....	24
3.3.3 Typy mikrovlnných detektorů.....	24
3.4 Infračervené detektory.....	25
3.4.1 Aktivní infračervené detektory.....	25
3.4.2 Pasivní infračervené detektory .....	27
3.5 Video detektory .....	28
3.5.1 Starší video detektory.....	28
3.5.2 Novější video detektory .....	28
3.6 Kombinované detektory .....	29
3.6.1 Kombinovaný detektor TDC3 .....	30
3.7 Optické senzory.....	31
3.7.1 Interferometrické senzory.....	32



3.7.2	Věda a výzkum.....	32
3.8	Sumarizace metod .....	34
4	Praktická měření detekce tramvají .....	35
4.1	Metodika měření tramvajových vozidel.....	37
4.2	Automatizovaný program v LabView.....	38
4.2.1	Výběr typů tramvají .....	38
4.2.2	Intenzita působení průjezdu tramvaje na okolí.....	39
4.2.3	Výpočet závislosti výkonu signálu na rychlosti .....	39
4.2.4	Průměr frekvenčních spekter.....	40
4.3	Výpočet rychlosti .....	40
4.3.1	Práh .....	41
4.3.2	Vážený průměr energie v čase.....	41
4.3.3	Výsledky rychlostí.....	42
4.4	Časová oblast .....	43
4.5	Frekvenční spektrum .....	45
4.6	Analýza náměrů výpočtů.....	48
4.6.1	Analýza vztahu mezi výkonem a rychlostí.....	48
4.6.2	Analýza obálky.....	50
5	Praktická měření detekce automobilů .....	51
5.1	Metodika měření automobilů .....	51
5.2	Výpočet rychlosti-automobily.....	51
5.3	Časová oblast a frekvenční spektrum-automobily .....	52
6	Diskuze.....	54
7	Závěr .....	55
	Literatura.....	56

## Seznam symbolů a zkratk

Symbol	Jednotka	Význam
<b>I</b>	voz/hod	Intenzita dopravního proudu
<b>H</b>	voz/km	Hustota dopravního proudu
<b>V</b>	km/hod	Rychlost dopravního proudu
<b>l</b>	m	Délkový odstup vozidel
<b>t</b>	s	Časový odstup vozidel
<b>N</b>	-	Počet vozidel
<b>V<sub>s</sub></b>	km/hod	Úseková rychlost vozidel
<b>V<sub>pn</sub></b>	km/hod	Střední rychlost dopravního proudu
<b>v<sub>0n</sub></b>	km/hod	Okamžitá rychlost vozidla
<b>p<sub>n</sub></b>	km/hod	Průměrná rychlost vozidla

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

### Seznam ilustrací

Obr. 1 Časový odstup mezi vozidly. ....	15
Obr. 2 Délkový odstup vozidel. ....	16
Obr. 3 Vztah intenzity a hustoty provozu. ....	17
Obr. 4 Vztah rychlosti a hustoty provozu. ....	18
Obr. 5 Vztah rychlosti a intenzity provozu. ....	18
Obr. 6 Prostorové detekční zóny. ....	20
Obr. 7 Pasivní detektor hluku SAS-1. ....	21
Obr. 8 Princip ultrazvukového detektoru. ....	22
Obr. 9 Ultrazvukový detektor T30. ....	23
Obr. 10 Mikrovlnný detektor pro měření rychlosti vozidla. ....	24
Obr. 11 Detektor pracující s pilovitou modulovanou frekvencí. ....	25
Obr. 12 Lidar na křižovatce. ....	26
Obr. 13 Princip aktivních infračervených detektorů. ....	27
Obr. 14 Princip pasivního infračerveného detektoru. ....	28
Obr. 15 Video detektor na křižovatce. ....	29
Obr. 16 Plocha snímání TDC3. ....	31
Obr. 17 TDC3 Kombinovaný detektor. ....	31
Obr. 18 Bodový senzor, distribuovaný senzor a kvazi-distribuovaný senzor. ....	32
Obr. 19 Zjednodušené schéma optického interferometru a vliv vibrací při projíždění aut. ....	33
Obr. 20 Experimentální měření s dvojicí měřících jednotek. ....	33
Obr. 21 Místo měření. ....	35
Obr. 22 Měřicí stanoviště. ....	36
Obr. 23 Fotografie projíždějící tramvaje ve směru na Hranečník. ....	36
Obr. 24 Metodika rozmístění senzorů. ....	37
Obr. 25 Blokový diagram automatizace. ....	38
Obr. 26 Blokový diagram select. ....	39
Obr. 27 Intenzita působení průjezdu tramvaje na okolí. ....	39
Obr. 28 Porovnání výkonu signálů vůči rychlostem tramvajů. ....	40
Obr. 29 Průměr frekvenčních spekter. ....	40
Obr. 30 Časový záznam pro výpočet rychlosti pomocí prahu. ....	41
Obr. 31 Výpočet rychlosti pomocí váženého průměru energie v čase. ....	42
Obr. 32 Porovnání všech použitých senzorů v časové oblasti. ....	43
Obr. 33 Časový záznam reprezentující průjezd dvou stejných typů tramvajových vozidel. ....	44
Obr. 34 Časový záznam reprezentující průjezd dvou různých typů tramvajových vozidel. ....	45
Obr. 35 Frekvenční spektrum reprezentující průjezd dvou stejných typů tramvajových vozidel. ....	46
Obr. 36 Frekvenční spektrum reprezentující průjezd dvou různých typů tramvajových vozidel. ....	46
Obr. 37 Průměr frekvenčních spekter-směr Karolína. ....	47
Obr. 38 Průměr frekvenčních spekter-směr Hranečník. ....	47
Obr. 39 Vztah mezi výkonem a rychlostí-oba směry. ....	49
Obr. 40 Vztah mezi výkonem a rychlostí-směr Hranečník. ....	49

Obr. 41 Časový záznam porovnávající původní signál s obálkou.....	50
Obr. 42 Program pro vytvoření obálky. ....	50
Obr. 43 Metodika měření automobilů. ....	51
Obr. 44 Výpočet rychlostí při detekci automobilů. ....	52
Obr. 45 Časový záznam reprezentující průjezd automobilu. ....	53
Obr. 46 Frekvenční spektrum reprezentující průjezd automobilu.....	53

## **Seznam tabulek**

Tab. 1 Sumarizace metod. ....	34
Tab. 2 Výsledky výpočtů rychlostí tramvají jedoucích směrem na Karolínu. ....	42
Tab. 3 Výsledky výpočtů rychlostí tramvají jedoucích směrem na Hranečník.....	43

# 1 Úvod

Česká republika díky své geografické poloze ve středu Evropy, je územím, které má významný rozvojový potenciál zejména v oblasti pozemní dopravy. Železniční doprava na českém území existuje už od roku 1827, kdy byl zahájen provoz koněspřežné dráhy z Českých Budějovic do Lince. První elektrická trať na českém území byla zařazena do provozu v roce 1957. Automobilová doprava v České republice se začala prudce rozvíjet po roce 1990. Dnes silniční doprava zajišťuje velikou část přepravy osob a zboží. Tramvajová doprava se na Českém území objevila v Brně v roce 1869, byla to první koňská tramvaj. Takzvané koňské tramvaje byly vystřídány tramvajemi s parním pohonem. Tramvaje, které se využívají dnes jsou na elektrický pohon, a první elektrická tramvaj v České republice byla zprovozněna v roce 1891 v Praze.

Z historie je vidět, že pozemní doprava je z hlediska času a komfortu nedílnou součástí našich životů, proto se pořád zvětšuje počet dopravních prostředků na silničních komunikacích. Kvůli zvětšenému provozu začínají různé problémy. Nejčastěji tvorba kolon, méně volných parkovacích míst na parkovištích, překračování dovolené rychlosti, či více dopravních nehod. Je nezbytné zavést opatření pro zachování bezpečné a komfortní jízdy v provozu, a k tomu slouží různé druhy senzorů a detektorů.

Nejčastěji používanými neintrusivními detektory jsou mikrovlnné detektory a video-detekce. V provozu se lze setkat ale i s dalšími druhy těchto detektorů, které mají své určité výhody a nevýhody. Rostoucí dopravní intenzity zvyšují zatížení dopravní sítě do nepříznivých hodnot a využití dopravních komunikací dosahuje maximálních kapacit. Tyto detektory sledují aktuální dopravní situaci v daném úseku komunikace. Jsou to informace o přítomnosti vozidel a chodců na světelných křižovatkách, či na dálnicích. Taky ve městě je mobilita a doprava jeho nezbytnou součástí. Cestování přes město by mělo být bezproblémové, pohodlné a bezpečné. Díky neintrusivním detektorům lze získat potřebné informace o dopravě a zajistit dynamické řízení dopravy bez nutnosti zásahu do vozovky.

Úvod bakalářské práce se zaměřuje na teoretický popis a pochopení problematiky dopravního provozu se všemi základními veličinami. Charakteristiky vozidel jsou zaznamenávány různými způsoby, a každý detektor díky svým vlastnostem může být použit pro jiný druh detekce. Proto je zde dále rozbor a rešerše stávajících senzorů, kde je popsán princip fungování a vlastnosti těchto přístrojů.

Cílem mé bakalářské práce, bude využít obzvláště pneumatické senzory a neintrusivní detektory v reálném provozu. Na základě realizovaných experimentů byly stanoveny statistické parametry dopravního provozu, dále přesnost a vhodnost navržených senzorů. Hlavním parametrem, který byl analyzován, byla rychlost. Rychlost byla vypočítána z dvou pneumatických senzorů v přesně definované vzdálenosti. Dalším sledovaným parametrem byl průběh signálu v časové a frekvenční oblasti, kde byla porovnána podobnost, či odlišnost mezi různými typy vozidel. V poslední řadě byla popsána závislost mezi výkonem a rychlostí.

## 2 Charakteristika dopravního provozu

Dopravní proud je proud, kde se nachází jednotlivá vozidla s určitými vlastnostmi, která se pohybují v určitém směru a v určitých podmínkách. Vozidla v dopravním proudu se navzájem ovlivňují, a proto je dopravní proud sledován jako celek. Záleží tedy na šířce a délce sledované trasy.

### 2.1 Základní charakteristické veličiny

Silniční doprava se dá stejně jako každý jiný dynamický proces, popsat charakteristickými veličinami a jejich změnami v čase, viz [2], [3], [4]. Takže jsou závislé na místě a čase. Slouží k popsání kvantity a kvality dopravního proudu. Kvantitou je jeho intenzita, a kvalitu vyjadřuje rychlost a plynulost v určitých podmínkách. Plynulostí dopravního proudu rozumíme změnu jeho akcelerace a decelerace, rychlostní gradient a změnu vlnění dopravního proudu. Za vlnění považujeme změnu intenzity a hustoty v čase, podrobněji v [19].

Nejvíce užívanými veličinami jsou:

- Intenzita dopravního proudu (I).
- Hustota dopravního proudu (H).
- Rychlost dopravního proudu (V).
- Délkový odstup vozidel (l).
- Časový odstup vozidel (t).

#### 2.1.1 Intenzita dopravního proudu

Intenzita dopravního proudu, která je označována v odborné literatuře (I), je definována jako počet vozidel jedoucích danou částí komunikace za jednotku času v jednom dopravním směru. Obvykle je vyjádřena ve vozidlech za hodinu (voz/hod), nebo ve vozidlech za den (voz/den). Vztah pro intenzitu dopravního proudu je definován rovnicí (1).

$$I = \frac{N}{t} [\text{voz/hod}], \quad (1)$$

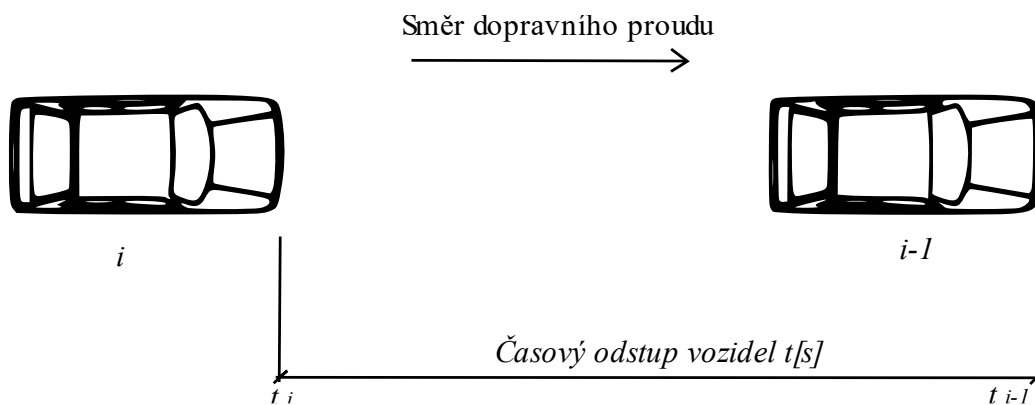
kde  $N$  je počet vozidel projíždějících daným profilem silnice a  $t$  je čas.

Odvozený parametr od intenzity:

#### Časový odstup vozidel:

Je definován jako čas, který uplyne mezi přejezdem čelních stran vozidel jedoucích za sebou v časovém profilu jízdního pruhu. Časový odstup vozidel je označován jako (t) a vyjádřen v (s). Znázorněn na Obr. 1 (převzato z [19]). Pokud by byl tento časový odstup konstantní, vozidla by od sebe držela stejný časový odstup bez ohledu na jejich aktuální rychlost. Tedy při zvyšující se rychlosti by

lineárně vzrůstal vzdálenostní odstup mezi vozidly. Předpoklad bezpečné vzdálenosti je  $t = 2$  s od předchozího vozidla. To znamená, že vozidla za sebou jedoucí, budou mít stejnou deceleraci a čas  $t$  by měl zohlednit reakční dobu řidiče a prodlevu brzdného systému, více v [19].



Obr. 1 Časový odstup mezi vozidly.

### 2.1.2 Hustota dopravního proudu

Hustota dopravního proudu se v odborné literatuře označuje ( $H$ ). Je definována jako počet vozidel, která se nacházejí v daném okamžiku na předem zvoleném úseku komunikace. Je vyjádřena ve vozidlech za kilometry (voz/km). Vztah pro hustotu dopravního proudu je definován rovnicí (2).

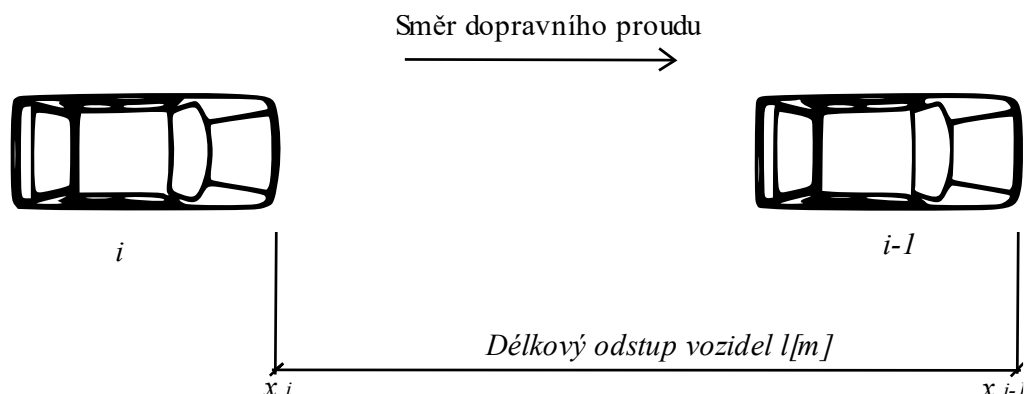
$$H = \frac{I}{v_s} [\text{voz/km}], \quad (2)$$

kde  $I$  je intenzita dopravního proudu a  $v_s$  je úseková rychlost vozidel, což je průměrná rychlost vozidel na daném úseku komunikace.

Odvozený parametr od hustoty:

#### Délkový odstup vozidel:

Je definován dynamickým obrysovým odstupem čelní strany vozidel, viz Obr. 2 (Převzato z [19]). Délkový odstup vozidel je označován v odborné literatuře jako ( $l$ ) a vyjádřen v (m). Pokud by byl tento vzdálenostní odstup konstantní, tak by se při zvyšující rychlosti lineárně zvyšovala i intenzita na komunikaci. Z hlediska kapacity silnice by to bylo vyhovující. Jako velmi nevhodný by se dal popsat z hlediska bezpečnosti. V tomto případě například při konstantním odstupu 5 m je časový odstup 2 s dosažen při rychlosti 9 km/h. Ovšem při rychlosti 130 km/h je časový odstup pouze 0,138 s, a za tuto dobu by člověk neměl žádnou šanci zareagovat včas a zabrzdit, podrobněji v [19].



Obr. 2 Délkový odstup vozidel.

### 2.1.3 Rychlost dopravního proudu

Rychlost je vektorová fyzikální veličina, která je definována dvěma základními veličinami, a těmi jsou délka a čas. V dopravním proudu je nejčastěji vyjádřena jako střední rychlost, která představuje průměr rychlostí každého vozidla projíždějícího daným úsekem komunikace za dané časové období. V odborné literatuře se značí jako  $(V)$ . Je vyjádřena v kilometrech za hodinu (km/hod). Vztah pro rychlost dopravního proudu je definován rovnicí (3).

$$V_{pn} = \frac{v_{01} \cdot p_1 + v_{02} \cdot p_2 \dots + v_{0n} \cdot p_n}{n}, \quad (3)$$

kde  $v_{pn}$  je vyjádření dopravního proudu jako střední rychlosti,  $v$  je okamžitá rychlost vozidla,  $p$  je průměrná rychlost daného vozidla a  $n$  je počet vozidel.

## 2.2 Vztahy mezi veličinami

Mezi základními veličinami existují určité vztahy. Vztahy, které vyjadřují jejich vzájemnou závislost. V následujících kapitolách jsou řádně popsány.

### 2.2.1 Vztah intenzity, hustoty a rychlosti

Vzájemný vztah mezi základními veličinami je definován rovnicí (4).

$$V \left( \frac{km}{hod} \right) = \frac{I \left( \frac{voz}{hod} \right)}{H \left( \frac{voz}{km} \right)}, \quad (4)$$

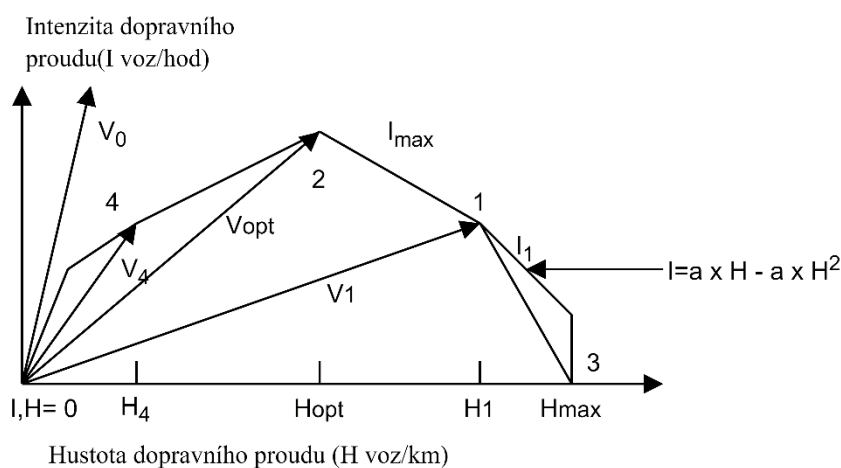
kde rychlost  $(V)$  je rovna intenzitě  $(I)$  podělené o hustotu  $(H)$ .



### 2.2.2 Vztah mezi intenzitou a hustotou v dopravním provozu

Vzájemný vztah intenzity a hustoty provozu je popsán následujícími charakteristikami a znázorněn na Obr. 3 (převzato z [2]).

- Pokud ve sledovaném úseku nejsou vozidla ( $I=0$ ), hustota i rychlost jsou nedefinovatelné.
- Pokud je hustota vozidel až tak vysoká, že znemožňuje pohyb vozidel, můžeme tento stav definovat jako stav s maximální hustotou ( $H=\max$ ) dopravního proudu, ale rychlost i intenzita jsou v tomto stavu nulové ( $V=0$ ,  $I=0$ ).
- Pokud je intenzita maximální ( $I=\max$ ), rovná se tedy kapacitě jízdního pruhu, je dosažena optimální hustota i rychlost dopravního pruhu.

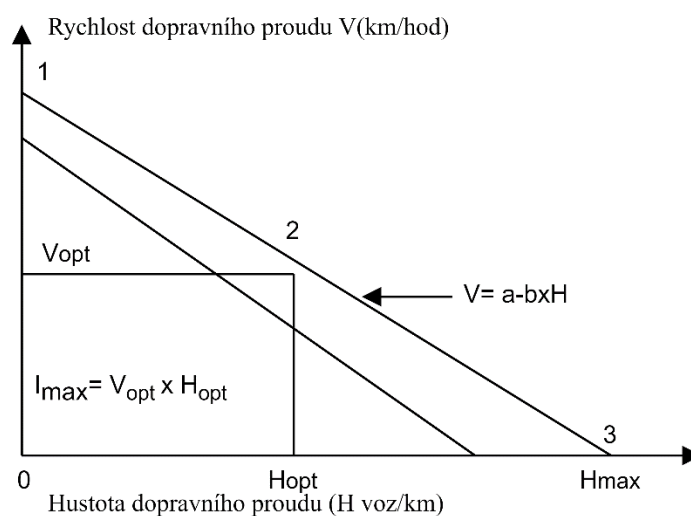


Obr. 3 Vztah intenzity a hustoty provozu.

### 2.2.3 Vztah mezi rychlostí a hustotou v dopravním provozu

Vzájemný vztah rychlosti a hustoty provozu je popsán následujícími charakteristikami a znázorněn na Obr. 4 (převzato z [2]).

- Maximální rychlost ( $V=\max$ ) a minimální hustotu ( $H=\min$ ), dosáhneme ve sledovaném úseku, když se na něm pohybuje jedno vozidlo.
- Optimálního využití sledovaného úseku dosáhneme při optimální hustotě a rychlosti.
- Pokud je hustota proudu maximální ( $H=\max$ ), znamená to, že se vozidla nemohou pohybovat, takže je rychlost minimální ( $V=\min$ ).

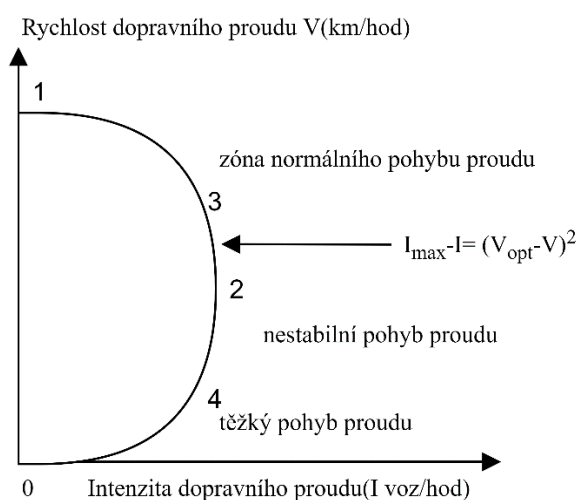


Obr. 4 Vztah rychlosti a hustoty provozu.

## 2.2.4 Vztah mezi rychlostí a intenzitou v dopravním provozu

Vzájemný vztah rychlosti a intenzity provozu je popsán následujícími charakteristikami a znázorněn na Obr. 5 (převzato z [2]).

- Mezi body 1-3 je rychlost vysoká a intenzita nízká, takže je provoz po dopravním proudu normální a nevznikají kolony.
- Mezi body 3-4 je zóna, kde je pohyb proudu nestabilní, intenzita proudu se zvyšuje a rychlost proudu klesá.
- Kolem bodu 2 je intenzita maximální ( $I = \max$ ), takže rychlost dopravního proudu je optimální.
- Mezi body 4-0 je pohyb po dopravním proudu nestabilní. Předjíždění je nemožné, a může dojít až k zastavení pohybu po dopravním proudu, pokud je rychlost nulová ( $V=0$ ) a hustota maximální ( $H=\max$ ).



Obr. 5 Vztah rychlosti a intenzity provozu.

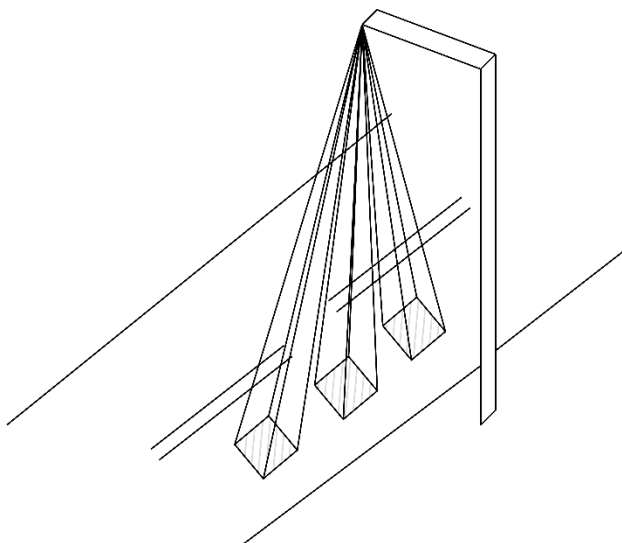
### 3 Neintrusivní detektory

Neintrusivní dopravní detektory jsou senzory pro detekci provozu, které svými konstrukčními prvky nezasahují do oblasti, kterou řidič projíždí. Mohou být také nasazeny o mnoho bezpečněji než jiné konvenční detekční metody. Například indukční smyčky, které jsou umístěny pod povrchem vozovky. Nejčastěji do předem vyřezané spáry v jízdním pruhu, čímž dochází k dočasnému omezení dopravního proudu. Na základě této definice nemusí být neintrusivní senzory nasazeny na chodnících, či pod povrchem vozovky, ale mohou být namontovány na kraji vozovky, nebo nad ní. Dají se jednoduše přemístit, takže jsou považovány za mobilní detektory. Také senzory, které jsou nainstalovány „tlačáním“ potrubí pod vozovku, jsou považovány za neintrusivní, více v [5].

#### 3.1 Pasivní detektory hluku (zvuku)

Pasivní akustické detektory využívají místo vlastního zdroje signálu akustickou energii nebo slyšitelný zvuk, který vytvářejí pohybující se objekty. Ku příkladu energie vznikající při běhu motoru vzájemným působením pneumatik vozidla s vozovkou, nebo vlakem a kolejnicemi. Jeden nebo více plošných směrových detektorů (mikrofonů) tvoří detekční zóny, ty jsou zobrazeny na Obr. 6 (Převzato z [6]). Směrový mikrofón je detektor, který měří časové rozdíly přicházející zvukové vlny mezi krajními částmi detektoru namířeného do detekční zóny. Časové rozdíly jsou v zóně minimální. Když auto přijíždí do zóny, tak se časové rozdíly zkracují, a když auto odjíždí ze zóny, tak se prodlužují. Zvuk mimo detekční zónu je potlačen. Směrové mikrofony se používají kvůli snadné údržbě a instalaci, viz [13]. Detekční zóny jsou nasměrovány tak, aby snímaly hluk z různých míst vozovky, a aby jejich rozestup byl známý. Zvýšení hluku při průjezdu pohybujícího se objektu detekčními zónami, je algoritmem na zpracování signálu zaznamenáno v různých časech. Díky tomu lze změřit počet, směr jízdy, rychlost nebo délku vozidel. Když vozidlo opustí detekční zónu, energie zvuku poklesne na práh detekce, a tím se ukončí signál přítomnosti vozidla, viz [7].

Nepříznivý vliv na tento typ snímačů mají podnební podmínky, jako je silný vítr, sněžení, či také déšť. Je to způsobeno tím, že tyto typy počasí zkreslují akustickou vlnu vysílanou projíždějícími automobily, viz [8].



Obr. 6 Prostorové detekční zóny.

#### Měřicí parametry

- Intenzita.
- Hustota.
- Rychlost.
- Klasifikace vozidel.
- Přítomnost vozidel.
- Směr jízdy.

#### Použití

- Operují ve frekvenčním pásmu 8–15  $\mu\text{Hz}$  a ve výšce 6–12 metrů nad vozovkou.

#### Výhody

- Pasivní detekce.
- Odolné vůči vlhkosti.
- Možné měřit zároveň více jízdních pruhů.

#### Nevýhody

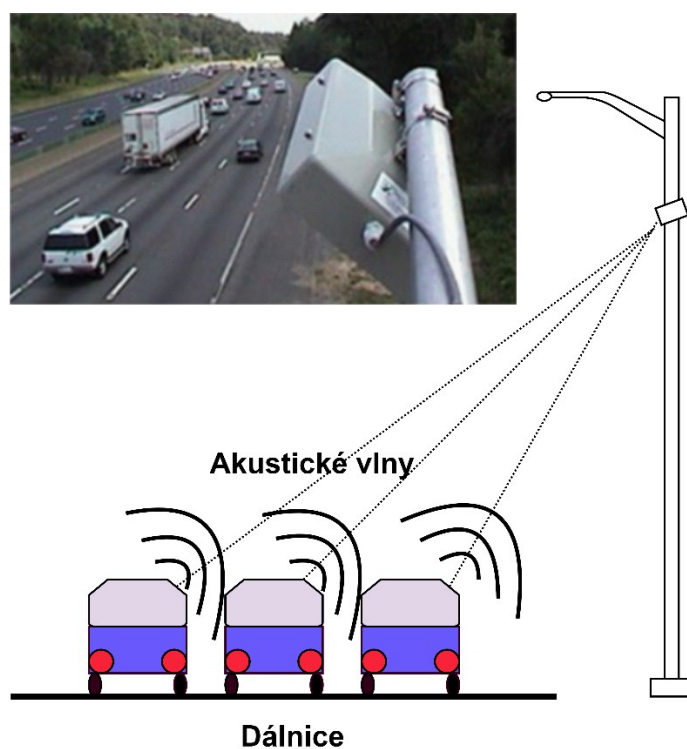
- Snížení přesnosti při nízkých teplotách.
- Nevhodné pro detekci v rychle se měnících dopravních podmínkách (stop and go traffic).

### 3.1.1 Pasivní detektor hluku SAS-1

Konkrétním typem pasivního detektoru zvuku je detektor SAS-1, který můžeme vidět na Obr. 7 (převzato z [14]). Tento detektor je velmi cenově dostupný a instalace není složitá. Poskytuje spolehlivou detekci vozidel i na více jízdních pruzích najednou, a to až na pět, bez zásahu do silnice z jejího okraje. Pracuje s velmi nízkým příkonem a s flexibilními komunikačními módy pro senzorové stanice, poháněné solárním systémem. Velkou výhodou je možnost bezdrátové komunikace, což eliminuje nutnost instalace dlouhých a drahých kabelových vedení, více v [14].

### Vlastnosti SAS-1

- Měření provozu v reálném čase a archivace dlouhodobých měření.
- Nízké náklady na instalaci, montáž na stávající silniční struktury.
- RS-422 Home Run (až 2 K ft) nebo možnost Wireless pro vyloučení HR kabelu.
- Dotázaná nebo periodická komunikace s flexibilními formáty zpráv.
- 10 optoizolovaných výstupů relé přítomnosti vozidla na jednu hlavu SAS-1.
- Kompletní schopnost zpětné smyčky pomocí externích karet SAS Relay.
- Unikátní ID, více hlav SAS-1 může sdílet jeden domácí kabel nebo bezdrátové připojení.
- Nízká spotřeba energie (1,7 W) podporuje solární stanice s čidly.
- Požadavky na napájení-12 VDC až 24 VDC.
- Rozměry-3,5 "H x 8,0" Š x 12,0 "L.
- Teplota-20 ° C až +75 ° C.
- Hmotnost včetně montážního držáku-méně než 7 liber.
- Dvouletá záruka.



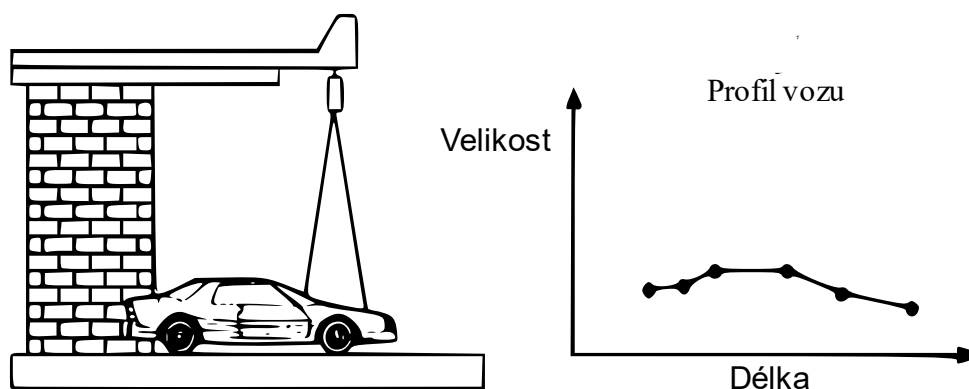
Obr. 7 Pasivní detektor hluku SAS-1.

## 3.2 Ultrazvukové detektory

Principem ultrazvukových detektorů je vysílání ultrazvukových vln pod úhlem 20–90 stupňů k vozovce, s frekvencí od 25 kHz do 50 kHz, které jsou nad prahem slyšitelnosti, viz [3]. Ultrazvukové vlny jsou generovány elektrostrikcí, tj. kmitáním piezo-keramického elementu buzeného střídavým napětím, více v [11]. Měří se čas, za který se vlna vysílaná v pravidelných intervalech odrazí od jedoucího objektu a vrátí se zpět k detektoru. Část vlny se odráží od cesty, a další část se odráží od auta, díky tomu lze získat informaci ohledně rychlosti, tvaru, směru jízdy a počtu vozidel jedoucích za sebou, nebo i ve více jízdních pruzích. Princip ultrazvukového detektoru je zobrazen na Obr. 8 (Převzato z [11]).

Ultrazvukové detektory lze rozdělit na pulzní a Dopplerovské. Pulzní snímače vysílají krátké ultrazvukové pulzy, a po jejich odrazu měří čas, za který se vrátí zpět do snímače. Dopplerovské snímače vysílají nepřetržitý ultrazvukový signál a na principu Dopplerova jevu měří frekvenční posun přijatého signálu, podrobněji v [10].

Přesnost měření mohou ovlivnit změny teploty a extrémní poryvy větru. Také dlouhé intervaly mezi vysílanými vlnami mohou omezit přesnost měření, především pro vyšší rychlosti vozidel, viz [3].



Obr. 8 Princip ultrazvukového detektoru.

### Měřicí parametry

- Dopplerovské – počet vozidel, směr jízdy, rychlost.
- Pulzní-počet vozidel, rychlost, směr jízdy, přítomnost, rozměry.

### Použití

- Vysílají ultrazvukové vlny s frekvencí 25 až 50 Hz ve vzdálenosti od vozovky 0,5 až 8 metrech.

### Výhody

- Aplikace na více jízdních pruzích.
- Malé rozměry.
- Snadná instalace.

### Nevýhody

- Extrémní poryvy větru a změny teplot ovlivní přesnost.
- Pulzní mají problémy s rychle jedoucimi auty.

- Dopplerovské neměří rychlost vozidel pod určitou minimální rychlost.

### 3.2.1 Ultrazvukový detektor T30

Ultrazvukový senzor T30 je jednodušší typ detektoru a je ekonomickým způsobem pro nepřetržitou detekci objektu v jeho detekčním poli. Je ideální pro detekci přítomnosti vozidla při průjezdu zatáčkou, kdy je T30 nainstalováno vedle silnice, nebo přímo nad jízdním pruhem. Používá se také s automatickými branami, mýtnými kabinami, pro řízení provozu na dálnici, pro sledování nakládacího můstku a další aplikace pro řízení parkování. Lze jej snadno namontovat nad zem. Nevyžaduje žádné řezání do chodníků ani do vozovky, protože se instaluje nad zemí, a při instalaci dochází k minimálnímu nebo k žádnému narušení provozu. Tento detektor je zobrazen na Obr. 9 (Převzato z [15]).

#### Vlastnosti T30

- Detekce skutečné přítomnosti jednoho pruhu/oblasti.
- Levná výměna detektoru smyčky.
- Snadná instalace nad zemí.
- Vstup do klasifikátoru a řadičů vozidel.
- Externí nastavovací panel.
- Externí kontrolky LED (usnadňují potvrzení testu jízdy).
- Bezpečný režim (odvolání) v případě výpadku napájení.
- Požadavky na napájení 6-12 VDC nebo 24-24 AC, 49,7 kHz.



Obr. 9 Ultrazvukový detektor T30.

### 3.3 Mikrovlnné detektory

Mikrovlny jsou vlny o vlnových délkách 1 dm až 0,1 mm. Vlnění v těchto délkách je nejčastěji využíváno v mikrovlnných troubách pro ohřev jídla. Toto vlnění generuje zařízení nazývané magnetron. Dále se mikrovlny využívají pro bezdrátovou komunikaci Wi-Fi.

Princip funkce je podobný jako u akustických detektorů s tím rozdílem, že mikrovlnné detektory využívají pásma vysokých frekvencí (Super High Frequency) 3 až 30 GHz. U těchto detektorů je důležité mít povolení od telekomunikačního úřadu pro využívání frekvence, více v [4].

Nejčastěji jsou umístovány nad vozovkou v 5-7 metrech, případně mohou být umístěny i vedle vozovky ve výšce 1,7-3 metrech, viz [12]. Princip mikrovlnných detektorů je zobrazen na Obr. 10 (převzato z [7]).

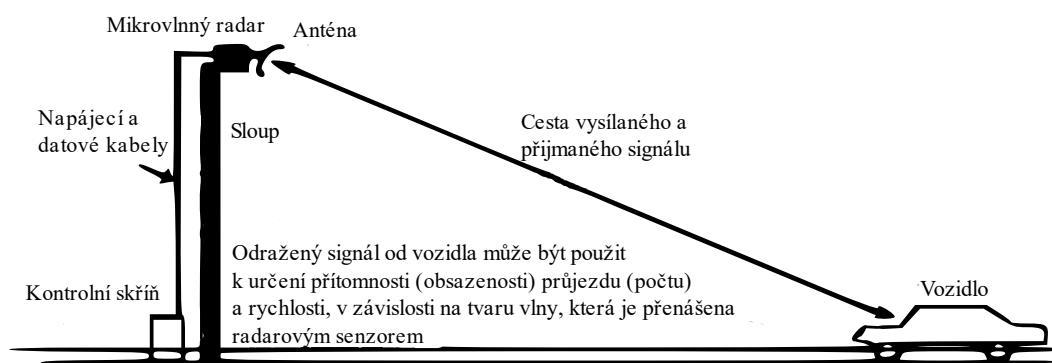
### 3.3.1 Provedení

Zdrojem mikrovlnných vln je většinou oscilátor s Gunnovou diodou umístěnou v dutinovém rezonátoru s rozměry odpovídajícími požadované vlnové délce. Vazební clonou je vlnění z oscilátoru převedeno do vlnovodu, který je spojený s anténou, obvykle ve tvaru trychtýře. Měřicí obvod zpracovává odrazení vln od objektu a je tvořen směšovačem, měřičem kmitočtu a zesilovačem, viz [11].

### 3.3.2 Výhody a nevýhody

Výhody mikrovlnných detektorů jsou zejména výhodnější směrové charakteristiky, vyšší přesnost měření a odolnost proti větru, hluku, prachu, či vlhkosti a mlhy. Dále možnost fungování ve dne i v noci a použití ve více jízdních pružích.

Nevýhodami jsou problémy při extrémně nízkých teplotách, při hustém provozu a při měření pomalu se pohybujících či stojících vozidlech, viz [3], [11].



Obr. 10 Mikrovlnný detektor pro měření rychlosti vozidla.

### 3.3.3 Typy mikrovlnných detektorů

Existují dva typy mikrovlnných detektorů:

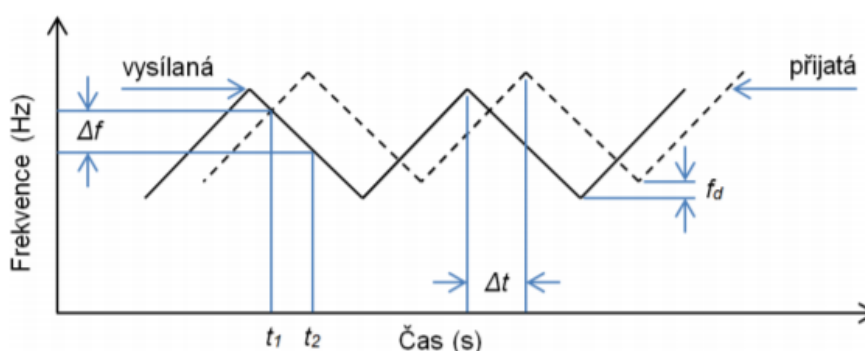
- Využívající Dopplerův jev.
- Detektory s frekvenčně modulovaným spojitým vlněním.

Detektory využívající Dopplerův jev, vysílají signál s konstantní frekvencí i amplitudou. Rychlost vozidla je vyhodnocena rozdílnou frekvencí mezi vysílaným a přijímaným signálem. Dále poskytují detekci dopravního zatížení, obsazenost jízdního pruhu a klasifikaci vozidel podle délky. Tento typ mikrovlnného detektoru nelze využít pro detekci stojících či pomalu pohybujících se vozidel. Je to způsobeno tím, že nedojde k zaznamenání rozdílu vysílaných a přijímaných frekvencí, proto se nepoužívají jako přítomnostní detektory na křižovatkách.



Druhý typ mikrovlnných detektorů s frekvenčně modulovaným spojitým vlněním mění kontinuálně vysílanou frekvenci v čase, frekvence má nejčastěji pilovitý průběh. Z odraženého se signálu od vozidel se průběžně určuje vzdálenost k radaru. Vzdálenost se určuje rozdílem frekvencí vysílajících se v čase  $t_1$  a odražených se v čase  $t_2$ , nebo z časových rozdílů po sobě jdoucích frekvenčních špiček  $\Delta t$ . Ze vzdálenosti se pak odvozuje rychlost vozidel. Umožňuje detekci stojících či pomalu se pohybujících vozidel, díky měnícímu se rozsahu měření. Princip zobrazen na Obr. 11.

Moderní detektory využívají frekvenčně modulované detektory pro sledování pomalu se pohybujících či stojících vozidel, v kombinaci s měřením rychlosti pomocí Dopplerova posuvu frekvence. Hlavně kvůli nepřesnostem v měření, které způsobuje změna frekvence odrazu u pohybujících se vozidel, více v [6], [7].



Obr. 11 Detektor pracující s pilovitou modulovanou frekvencí.

### 3.4 Infračervené detektory

Infračervené detektory detekují světelnou energii generovanou vozovkami nebo vozidly. V zásadě snímače přeměňují odraženou nebo přijatou světelnou energii na elektrické signály, které je následně možno zpracovávat v reálném čase. Dělí se na dva druhy: Aktivní (laserové) a pasivní.

#### 3.4.1 Aktivní infračervené detektory

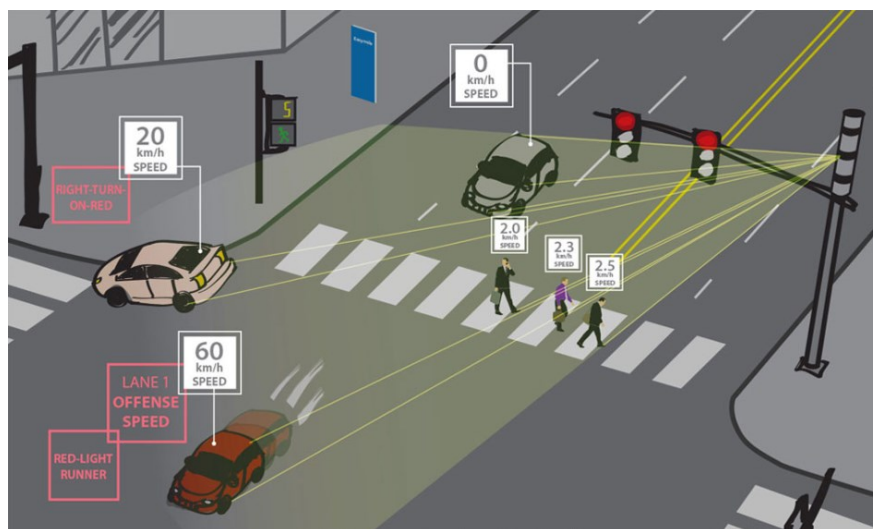
Nejčastěji využívají laserové diody, které jsou nasměrovány na danou detekční zónu. Na tuto zónu vysílají nízkenergetické vlny, které jsou v infračerveném spektru (přibližně 0,85-9  $\mu\text{m}$  vlnové délky). Vlny odražené od vozidla zpět k detektoru, jsou zpracovány optickým systémem. Doba mezi vysláním a přijetím pulzu je přímo úměrná vzájemné vzdálenosti objektu a detektoru. Rychlost se měří tak, že se změří čas průjezdu vozidla mezi dvěma laserovými paprsky, které jsou nastaveny tak, aby snímaly předem danou vzdálenost v jízdním pruhu, podrobněji v [7], [12]. Princip je znázorněn na Obr. 13 (Převzato z [7]).

##### 3.4.1.1 Lidary

Lidary jsou aktivní infračervené detektory využívající optický vysílač a přijímač. Vysílačem optického záření je směrový laser a přijímač pracuje se širším úhlem příjmu, díky tomu lépe sbírá

rozptýlené záření. Lidary vysílají více paprsků, které tvoří detekční zóny, čímž je přesně zaznamenáno jejich narušení. Více paprsků se dosáhne pomocí čoček, nebo rotujícím zrcadlem. Vysílají sekvenci pulzů, čímž detekují nespojitě vzdálenost mezi radarem a objekty. Rychlost šíření optického záření závisí na prostředí a na počasí. Výhodou lidaru je menší rozptýl paprsků oproti jiným typům radarů, čímž je možno konstruovat menší detekční zóny. Princip funkce lidaru je zobrazen na Obr. 12.

Konstrukce musí vyhovovat standardům bezpečnosti laserových zařízení IEC 60825-1:2014. Obvykle vyhovují třídě 1, viz [6].



Obr. 12 Lidar na křižovatce.

### Měřicí parametry

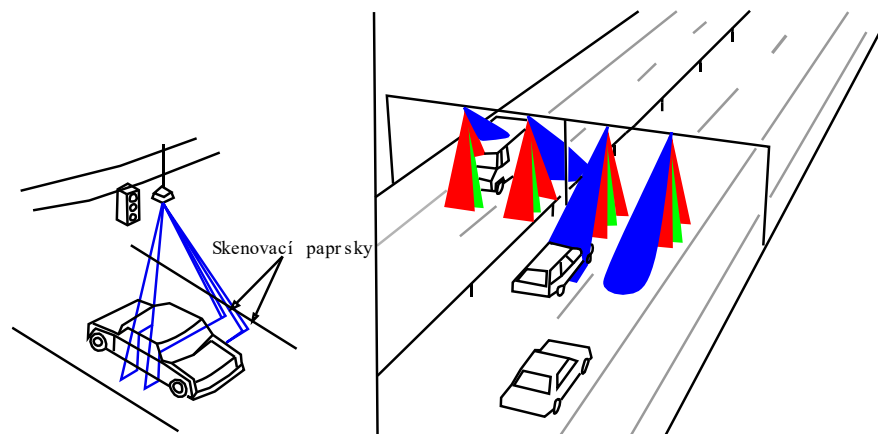
- Počet.
- Přítomnost.
- Směr jízdy.
- Typ vozidla
- Rychlost.

### Výhody

- Může pracovat ve dne i v noci.
- Provoz ve více jízdních pruzích.
- Kvalitní klasifikace vozidel.

### Nevýhody

- Jejich vlastnosti se zhoršují při husté mlze, nebo při hustých sněhových vánicích.
- Při instalaci na nevhodných místech, může docházet k zastínění vozidel jinými vozidly.
- Instalace nebo údržba někdy vyžaduje uzavěrku silnice.



Obr. 13 Princip aktivních infračervených detektorů.

### 3.4.2 Pasivní infračervené detektory

Pasivní infračervené detektory nevysílají žádný signál, fungují tak, že přijímají tepelnou energii z projíždějících vozidel. Využívají k tomu detektor citlivý na tepelné záření, který je umístěn v optické ohniskové rovině. Ta zaznamenává infračervenou energii, kterou vyzařují objekty v detekčních zónách. Každý objekt, který nemá teplotu rovnu absolutní nule ( $-273,15\text{ °C}/0\text{ °K}$ ), vyzařuje tepelnou energii. Pasivní infračervený detektor tuto energii měří v tzv. „daleké infračervené oblasti“ ( $8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$ ). Detekce je založena na rozdílu teplot a rozdílu vyzařování mezi vozidlem a vozovkou, či vlakem a kolejnicemi, více v [7], [12], [6]. Jejich princip je znázorněn na Obr. 14 (Převzato z [7]).

#### Typy pasivních infračervených detektorů

- Zobrazovací–využívají jedno nebo více čidel a dovedou zobrazit přijímaný signál.
- Nezobrazovací–používají jedno nebo více čidel, ale nedokážou zobrazit přijímaný signál.
- Jednoduché–měří rozdíly teplot mezi vozovkou a vozidlem.
- Dvojité–dva senzory, každý zvlášť měří dopadající záření, které se pak mezi sebou porovnává.

#### Měřicí parametry

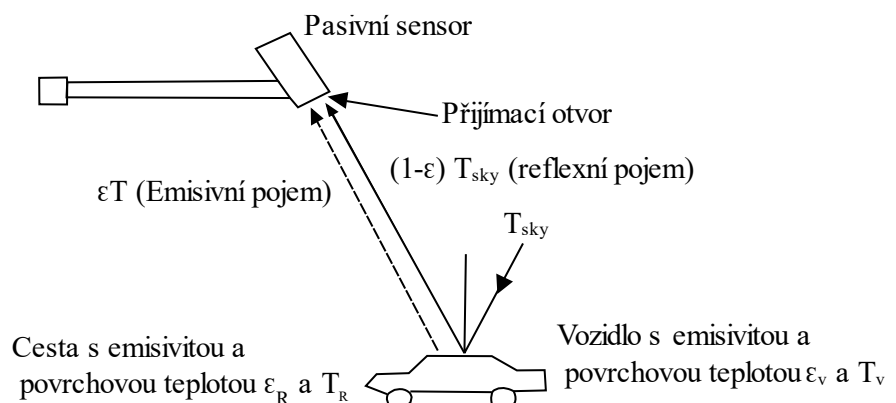
- Počet.
- Směr jízdy.
- Přítomnost.
- Rychlost vozidel.

#### Výhody

- Pracuje ve dne i v noci.

#### Nevýhody

- Nepříznivý vliv na přesnost detekce mají prudké změny teplot a silný vítr.
- Na každý jízdní pruh je potřeba jeden detektor.
- Složitá kalibrace.



Obr. 14 Princip pasivního infračerveného detektoru.

### 3.5 Video detektory

Monitorování dopravy pomocí video detekce se začaly rozšiřovat od roku 1989. První zařízení bylo AUTOSCOPE. Video detektory vyžadují videokameru pro snímání obrazu a video procesor, který zpracovává obraz a dále ho přenáší operátorovi, viz [6], [12].

#### 3.5.1 Starší video detektory

Jednodušší systémy vytvoří v zorném poli kamery několik lineárních detekčních zón. Pokud dojde ke změně stavů v jednotlivých pixelech zóny, tak to znamená, že projíždí vozidlo. Jednotlivé zóny jsou nastaveny tak, aby byla známá jejich vzájemná vzdálenost, takže vozidlo postupně narušuje jednu zónu za druhou. Tímto lze získat informace o rychlosti vozidla.

Složitější systémy v obraze vyhodnocují hrany, a tím tvoří dynamickou mřížku. Vozidlo je pak sledováno v jednotlivých polích této mřížky, takže lze detekovat, zda se tam nachází nebo nikoliv, viz [6].

#### 3.5.2 Novější video detektory

Fungují na principu digitalizace CCTV kamery, která vytváří mnohorozměrný bitový vektor. Kamera je nastavena a spojena s video detekčním zařízením. Na obrazu lze vytvářet virtuální smyčky, u kterých můžeme libovolně nastavovat polohu a tvar podle potřeby a umístění polohy kamery. Zajímavou inovací je taky přiřazování různých funkcí (např. detektor rychlosti, kolon, tvaru apod.) Při projíždění automobilu se změní barva, kontrast a jas na virtuálním detektoru, čímž je vozidlo identifikováno. Některé video detektory rozpoznávají vozidla podle státních poznávacích značek.

Hlavními výhodami jsou velkoplošné snímání i 8 pruhů, menší provozní náklady, použití virtuálních detektorů nebo kvalitní rozpoznání vozidla. Jejich princip je zobrazen na Obr. 15.

Nevýhodami jsou třeba zhoršení viditelnosti při nepříznivých povětrnostních podmínkách (hustý déšť, sníh, mlha nebo nepříznivé osvětlení), zakrytí menších vozidel většími a větší pořizovací cena. Kvůli těmto nedostatkům bývají někdy kombinovány s jinými typy detektorů.

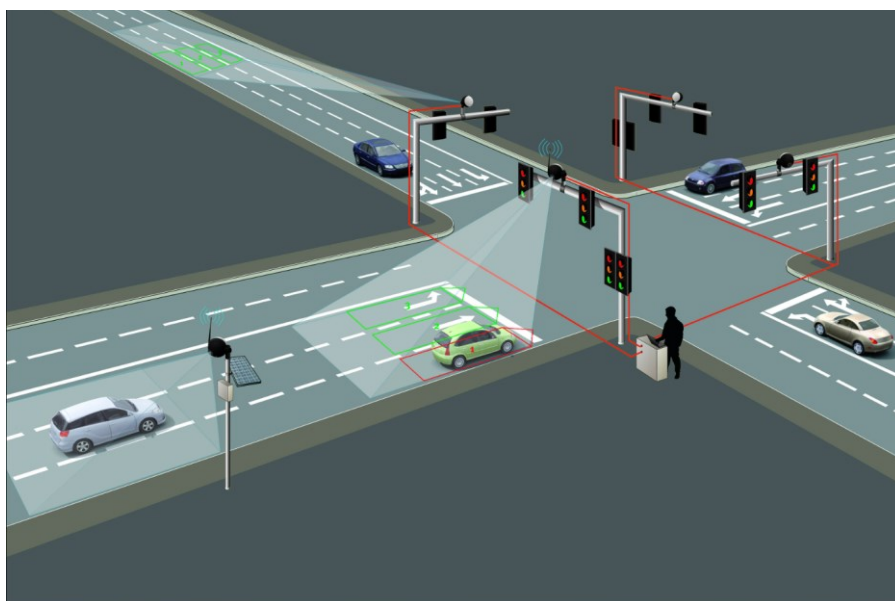
Často se využívají na křižovatkách, nebo v nebezpečných úsecích. Výhodné pro měření intenzity, přítomnosti, rychlosti a kategorizace vozidel. Umisťují se 3,5-6 metrů nad vozovku.

### Výhody

- Jedna kamera může pracovat na více jízdnicích pruzích.
- Mnoho různých dopravních dat.
- Snadné přidání dalších detekčních zón.

### Nevýhody

- Velká vozidla mohou zastínit menší.
- Problémy s vibrací kamery, nečistotami na objektivu, přechodem mezi dnem a nocí.
- Instalace a údržba někdy může zapříčinit uzavírku silnice.



Obr. 15 Video detektor na křižovatce.

## 3.6 Kombinované detektory

Kombinované detektory jsou složeny ze dvou a více technologií sloužících ke sběru dat a monitorování dopravy. Použitím více způsobů se umožní získat přesnější údaje, nebo změřit více parametrů dopravního provozu než za použití pouze jedné metody. Jde například o doplnění identifikace vozidel k jednoduchému počítání vozidel, měření jejich rychlosti, nebo například pro zvětšení dosahu detekce, či zvětšení sledovaného úhlu pohledu. Ke zpřesnění měření dochází hlavně při nepříznivých pracovních podmínkách, kdy jednotlivé technologie nejsou schopny přesně změřit potřebné parametry. Ku příkladu chybně detekují a klasifikují vozidla při dešťových, či sněhových srážkách, nebo nejsou schopny samostatně rozlišit jednotlivé jízdní pruhy, více v [6].

Typické je spojení video detektorů a lidarů. Kamera v tomto případě slouží k detekci objektů a jejich tvarů a vícebodový lidar slouží k přesnému měření vzdálenosti a klasifikaci, nebo fungují naopak, lidar detekuje a rozeznává objekty a video detektory slouží ke klasifikaci vozidel. Kombinací těchto dvou typů docílíme údajů o klasifikaci vozidla s chybou o mnoho nižší než s použitím pouze jednoho typu detektoru.

Dalším typem kombinovaných detektorů jsou detektory ASIM–je to kombinace mikrovlnných, ultrazvukových a pasivních infračervených detektorů. Mezi jejich vlastnosti patří:

- Určení klasifikační třídy vozidla.
- Počet všech druhů vozidel.
- Zachycení rychlosti jednotlivých vozidel.
- Indikace přítomnosti vozidla a rozpoznání dopravní zácpy.
- Zachycení obsazení a časového odstupu vozidel.

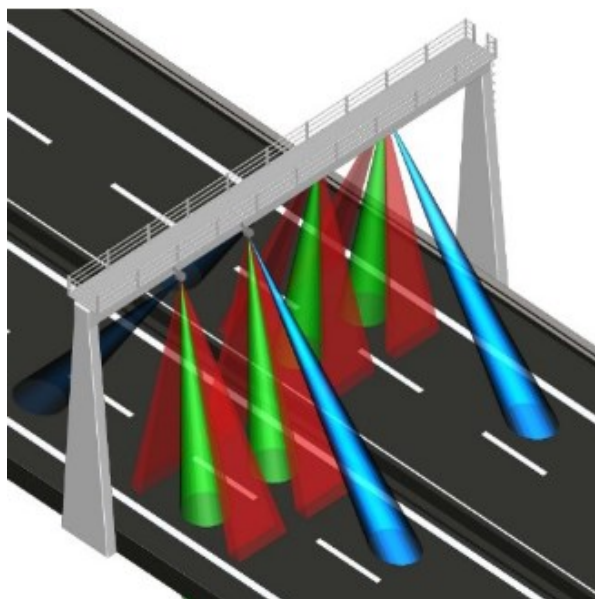
### **3.6.1 Kombinovaný detektor TDC3**

TDC3 je pokročilý detektor provozu využívající mikrovlnnou, ultrazvukovou a pasivní infračervenou technologii. Přes sériovou komunikaci RS485 jsou poskytovány komplexní dopravní údaje včetně jednotlivých tříd vozidel, rychlosti, délky, doby obsazení a časové mezery. Plocha snímání a samostatný detektor jsou zobrazeny na Obr. 16 a Obr. 17.

TDC3 je speciálně navržený pro sběr dat o provozu a řízení provozu. Měří rychlost každého vozidla pomocí Dopplerova posunu odražené mikrovlnné vlny. Ultrazvukový senzorový systém skenuje výškový profil projíždějícího vozidla a pasivní infračervená technologie získává polohu vozidla v pozorovaném pruhu. Je montován nad středem vozovky, podrobněji v [16].

#### **Vlastnosti TDC3**

- Klasifikace vozidla.
- Rychlost jednotlivého vozidla.
- Počítání vozidel.
- Skutečná přítomnost, fronta a detekce nesprávného směru vozidla.
- Měření obsazenosti a odstupu/času mezi vozidly.
- Plná teplotní kompenzace v celém teplotním rozsahu.
- Napájení 10,5 VDC až 30 VDC.
- Spotřeba Max 110 mA.



Obr. 16 Plocha snímání TDC3.



Obr. 17 TDC3 Kombinovaný detektor.

### 3.7 Optické senzory

Optické vlákno prostřednictvím světla přenáší signály. Vláknově optické senzory se rychle rozvíjejí v oblasti fotoniky a fotonických aplikací. Tato technologie je v dnešní době velmi významná, a to z důvodů daných hlavně materiálem, ze kterého je optické vlákno vyrobeno. Taky vlastnosti vláknově optických senzorů jsou velice pozitivní. Jsou velmi citlivé, pasivní z hlediska napájení elektrickou energií, odolné proti elektromagnetickému rušení, odolné vůči rzi, a jsou schopné pracovat při vysokých teplotách. Díky velkému rozšíření kabelů z optických vláken je možné je přímo připojit na stávající telekomunikační vláknově optické sítě, viz [17].

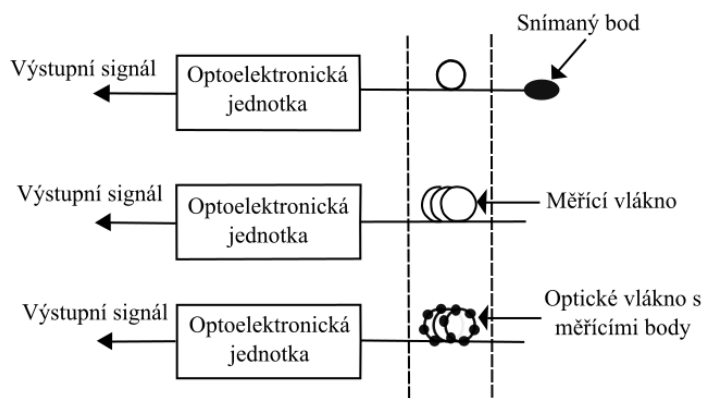
Existují dvě základní skupiny vláknově optických senzorů:

- Intrinžitní (zde optické vlákno slouží jako detektor požadované veličiny).
- Extrinžitní (senzory, kde optické vlákno slouží pouze k přenosu definované informace).

V této práci se zaměřuji na detektory, takže dále popsaný systém je intrinžitní. Ten se dále rozděluje dle prostorového uspořádání. Bodový senzor měří veličinu pouze v určitém čase. Distribuovaný senzor umožňuje měřit požadovanou veličinu podél celé vlastní délky optického vlákna a kvazi-distribuovaný senzor měří požadovanou veličinu v předem definovaných měřících bodech, viz Obr. 18 (Převzato z [17]).

Dále podle typu modulace, která je používána pro modulaci optického záření, lze intrinžitní vláknově optické senzory rozdělit do čtyř nejvíce rozšířených skupin:

- Intenzitní (amplitudová modulace).
- Polarimetrické (polarizační modulace).
- Interferometrické (fázová modulace) – nejcitlivější.
- Spektroskopické (frekvenční modulace).



Obr. 18 Bodový senzor, distribuovaný senzor a kvazi-distribuovaný senzor.

### 3.7.1 Interferometrické senzory

Tyto senzory detekují vibrace způsobené vozidly pohybujícími se po silnici. Princip funkce je založen na fázové modulaci světelné vlny šířící se uvnitř optického vlákna. Přesně nastavená vzdálenost mezi dvěma interferometry a časový odstup mezi nimi umožňuje zjistit rychlost objektu, nebo detekovat nápravu automobilu. Základní typy interferometrů jsou Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Perot a Sagnac. Nejvíce používaný je Mach-Zehnderův typ, více v [17].

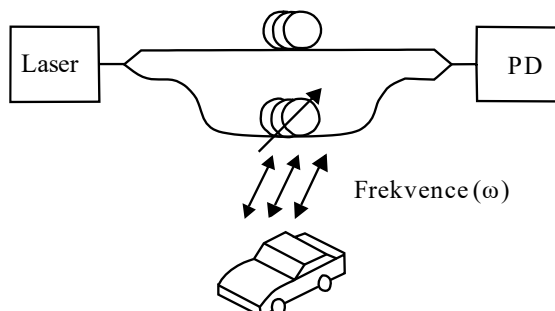
### 3.7.2 Věda a výzkum

Článek [18] popisuje systém pro měření dopravní rychlosti, který pracuje se dvěma interferometrickými jednotkami. Tyto jednotky používají modifikovaný Mach-Zehnderův interferometr s optickými vlákny. Na Obr. 19 (Převzato z [18]) můžeme vidět zjednodušené měřící schéma se



stabilním světelným zdrojem (laserem). Stabilním kvůli eliminaci nežádoucích signálů. Dále je na obrázku fotodetektor, který převádí výsledný paprsek světla na měřitelný elektrický proud.

Interferometr má dvě spojky. První rozdělí optický paprsek na dvě optické části, na měřicí L1 a referenční L2. Druhý vazební člen znovu spojí optický paprsek.



Obr. 19 Zjednodušené schéma optického interferometru a vliv vibrací při projíždění aut.

Referenční rameno je pokryto vrstvou polystyrenu, aby bylo kvalitně izolováno od nežádoucích signálů. Vibrace způsobené vozidly jsou nízké frekvence, takže měřicí interferometrické rameno je namontováno na rezonanční podložce z masivní skleněné tabule. Díky její pružnosti dochází ke kvalitnímu přenosu vibrací ze silnice na připojené optické vlákno. Měření je založeno na dvou identických jednotkách, umístěných v přesně definované vzdálenosti. Rychlost projíždějících vozidel je změřena díky známé vzdálenosti a časového rozpětí měřících jednotek.

Při experimentálních měřeních byla maximální absolutní odchylka 1,53 km/h s tolerancí oproti GPS  $\pm 1$  km/h. Z hlediska nízkých nákladů a možnosti připojení k telekomunikačním sítím jsou toto velmi zajímavé výsledky. Tolerance v CZE je  $\pm 3$  km/h při rychlosti do 100 km/h, podrobněji v [18].



Obr. 20 Experimentální měření s dvojicí měřících jednotek.

### 3.8 Sumarizace metod

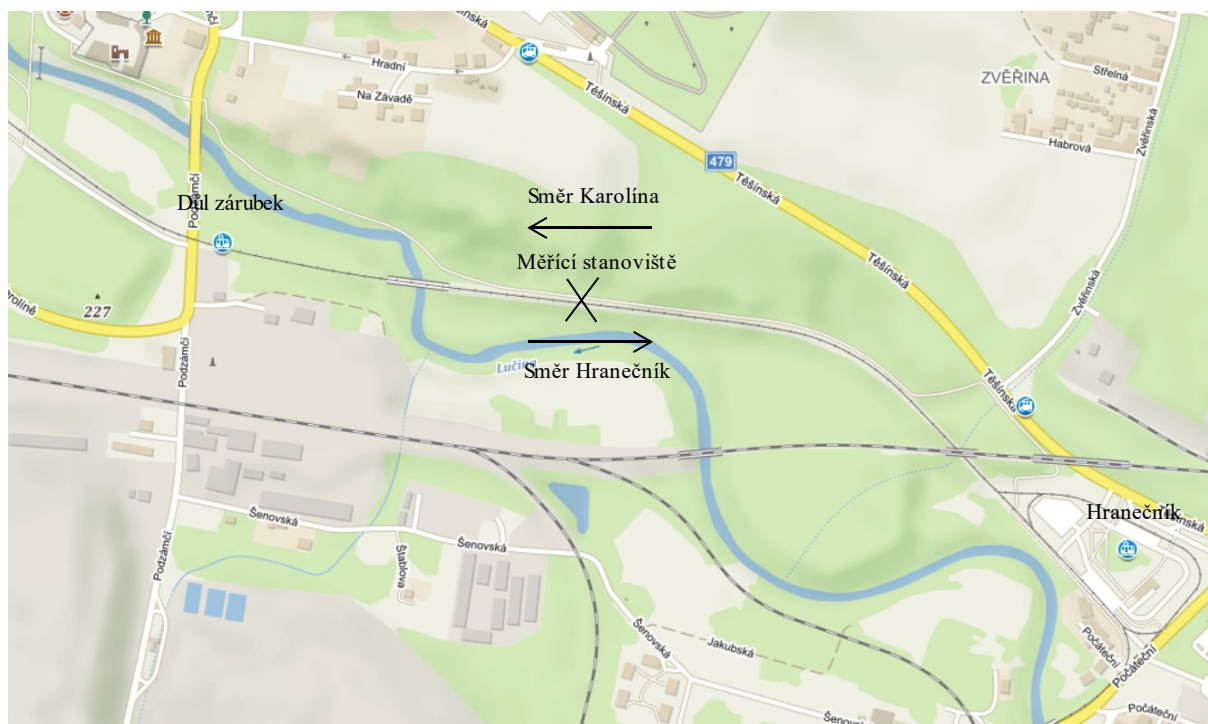
Zde v Tab. 1 je porovnání všech základních vlastností výše popisovaných metod. Z hlediska kvality je nejdůležitější popsat silné a slabé stránky, a taky přesnost jednotlivých detektorů. Přednostně to, jaké vlastnosti provozu dokážou vyhodnotit, kolik jízdních pruhů dokážou detekovat, a jejich odolnost vůči vnějším vlivům. Nesmí se však zapomenout na složitost instalace a konstrukce, se kterými je spojeno omezení provozu a údržba. V poslední řadě se porovnává cena jednotlivých technologií, ta je často klíčovým faktorem, nebo případným omezením při pořizování detektorů.

Tab. 1 Sumarizace metod.

Technologie	Výhody	Nevýhody	Instalace	Konstrukce	Přesnost	Cena
<b>Pasivní akustické</b>	Pasivní detekce  Odolné vůči vlhkosti  Více jízdních pruhů	Nízké teploty  Silný vítr  Stop and go traffic	Snadná	Střední	Střední	Dražší
<b>Ultrazvukové</b>	Více jízdních pruhů	Vítr  Změny teplot  Rychlost vozidel	Snadná	Střední	Přesnější	Střední
<b>Mikrovlnné</b>	Odolnost proti prachu, větru, vlhkosti, mlze  Ve dne i v noci	Nízké teploty  Stojící / pomalá vozidla	Snadná	Střední	Přesnější	Střední
<b>Aktivní infračervené</b>	Ve dne i v noci  Více jízdních pruhů	Mlha, sněhové vánice  Stínění vozidel jinými vozidly	Střední	Střední	Přesné	Drahé
<b>Pasivní infračervené</b>	Ve dne i v noci  Pasivní detekce	Silný vítr  Prudké změny teplot  Na jeden jízdní pruh	Střední	Střední	Střední	Střední
<b>Video detektory</b>	Více jízdních pruhů  Mnoho dat	Stínění vozidel  Nečistoty na objektivu	Střední	Střední	Přesné	Drahé
<b>Kombinované</b>	Mnoho dat  Přesnost	Cena	Střední	Složitější	Přesné	Drahé

## 4 Praktická měření detekce tramvají

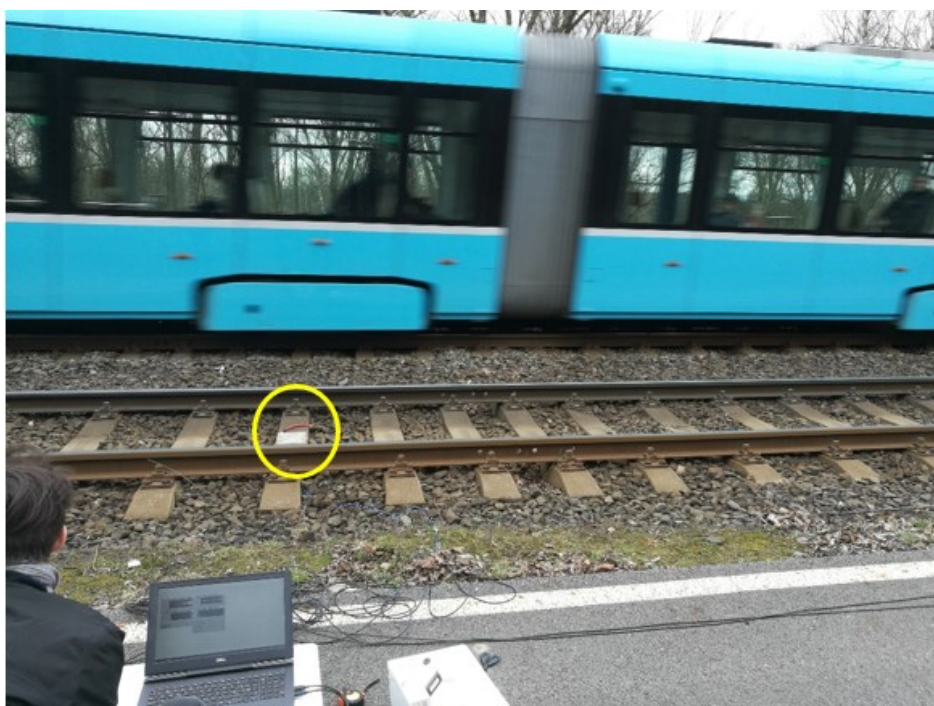
V této kapitole jsou popsány výsledky praktického měření tramvajových vozidel. V rámci měření byl aplikován experimentální senzor pro měření vzruchů šířících se do okolí z projíždějících tramvají. Měření proběhlo v reálném provozu v lokalitě Ostrava-Radvanice viz. Obr. 21. Měření probíhalo ve směru na Karolínu i na Hranečnick.



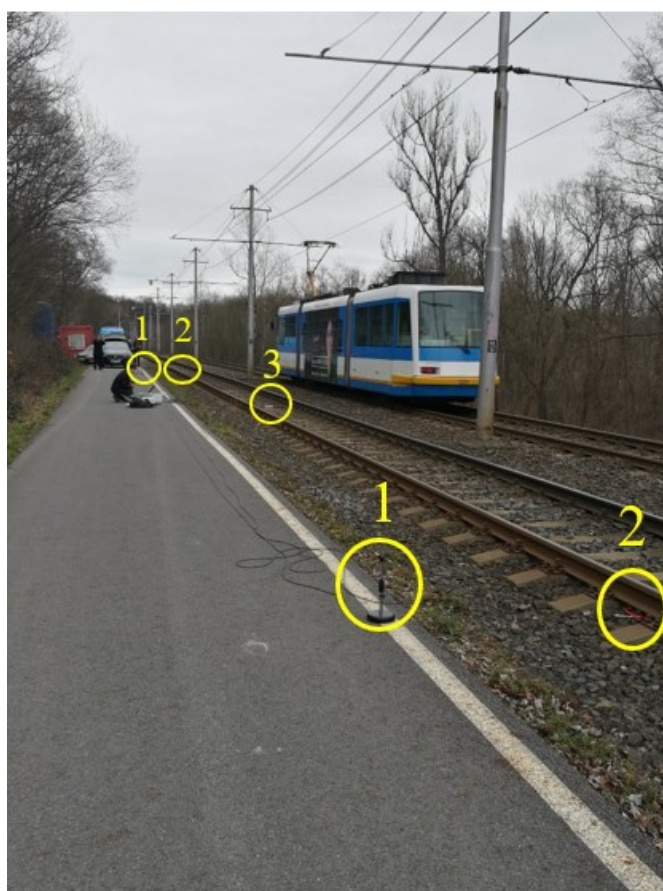
Obr. 21 Místo měření.

Naměřená data jsou porovnávána v různých oblastech. V časové oblasti, ve frekvenční oblasti a taky ve vzájemné závislosti mezi výkonem a rychlostí. Dále byly tramvaje zařazeny do různých skupin dle směru jízdy, počtu vozů, linky a zda jsou nízkopodlažní, či nikoliv. Tyto skupiny sloužily k nalezení podobností mezi signály.

Fotografie z průběhu praktického měření tramvajových vozidel jsou zobrazeny na Obr. 22. a Obr. 23. Na Obr. 22 můžeme vidět měřicí stanoviště, kde byly data ze snímačů ukládány do počítače. Ve žlutém rámečku je vyznačen pneumatický senzor-zapouzdřený, kde je pneumatická hadice zatavena v materiálu polydimethylsiloxan (PDMS). Dále je zde akcelerometr, který je umístěn z vnitřní strany kolejnice. Na Obr. 23 lze vidět tramvaj projíždějící kolem měřicího stanoviště ve směru na Hranečnick. V bodech 1 jsou znázorněny mikrofony, v bodech 2 pneumatické senzory a v bodě 3 již výše zmiňovaný pneumatický senzor-zapouzdřený a akcelerometr.



Obr. 22 Měřicí stanoviště.



Obr. 23 Fotografie projíždějící tramvaje ve směru na Hranečník.

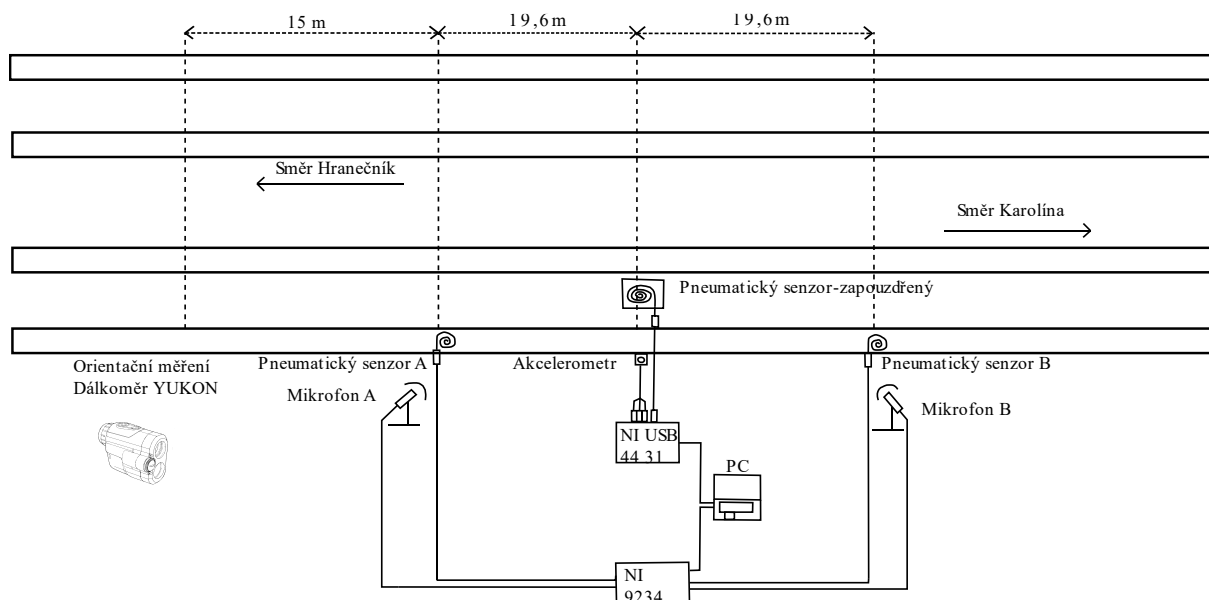
## 4.1 Metodika měření tramvajových vozidel

Senzory byly strategicky rozmístěny ve třech bodech, které jsou od sebe vzdáleny 19,6 m. V bodě A byl umístěn pneumatický senzor přímo pod kolejnicí, který funguje jako fyzikální převodník veličin a mění kmitání okolního podloží na tlak. Metr od kolejnice byl umístěn mikrofón, nasměrován směrem ke kolejnici. V bodě C bylo totožné rozmístění jako v bodě A. V bodě B byl umístěn ve středu koleje, přímo pod projíždějícími tramvajemi, pneumatický senzor-zapouzdřený. U kolejnice z vnitřní strany v bodě B, byl umístěn akcelerometr. Prostřednictvím zvukového a vibračního zařízení NI USB 4431 a vstupního modulu pro zvuk a vibrace NI9234, byly data ukládány do počítače.

NI USB 4431 je navrženo pro měření zvuku a vibrací. Má čtyři analogové vstupní kanály, které obsahují integrovanou elektronickou piezoelektrickou (IEPE) úpravu signálu pro akcelerometry a mikrofóny. Dále má jeden analogový výstupní kanál, podrobněji v [20].

NI 9234 je čtyř-kanálový dynamický modul používaný pro dosažení vysoké přesnosti měření ze snímačů (IEPE). Všechny vstupní kanály měří signály současně. Kromě toho tento modul obsahuje vestavěné antialiasingové filtry, které se automaticky přizpůsobí vzorkovací frekvenci, viz [21].

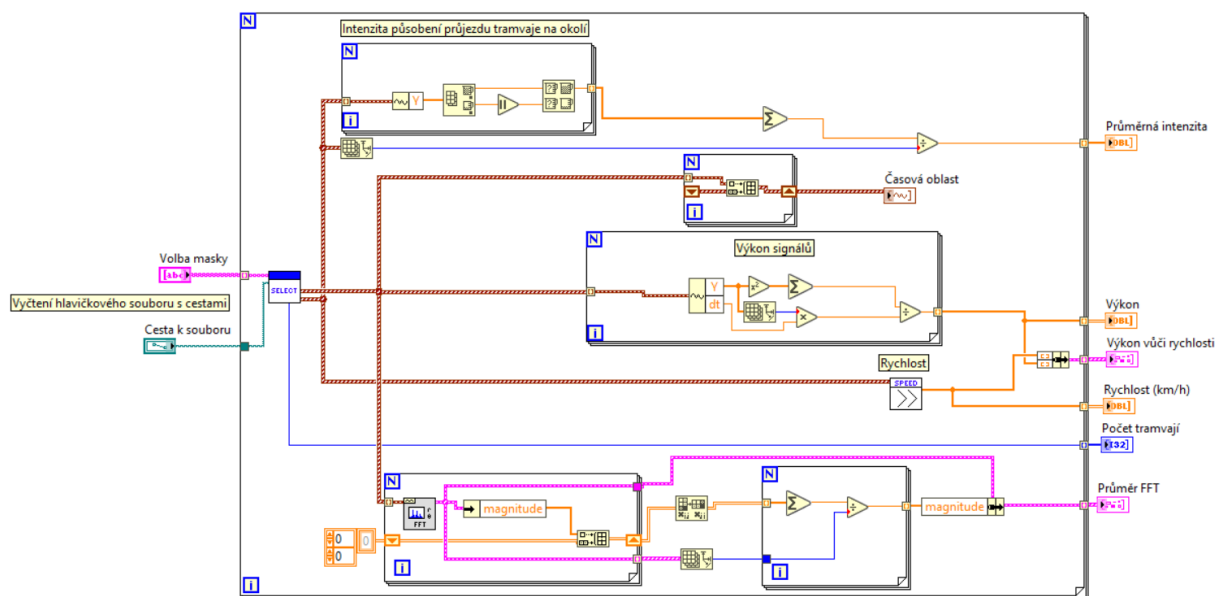
Ve vzdálenosti 15 metrů směrem na Hranečnick probíhalo měření pomocí dálkoměru YUKON. Tento přenosný elektro-optický přístroj je určený k přesnému měření vzdálenosti a rychlosti laserovým paprskem. Přístroj je kombinací monokuláru se zvětšením 6x a laserového dálkoměru, který má rozsah měření vzdálenosti 5 až 1000 m, a rozsah měření rychlosti 5 až 300 km/h, více v [22]. Údaje o rychlosti jednotlivých tramvají z tohoto senzoru, byly použity jako orientační hodnoty pro výpočet rychlosti. Metodika rozmístění senzorů je zobrazena na Obr. 24.



Obr. 24 Metodika rozmístění senzorů.

## 4.2 Automatizovaný program v LabView

Pro porovnání naměřených dat, byl vytvořen program v LabView. Blokový diagram je zobrazen na Obr. 25. Na čelním panelu, který slouží pro ovládání a nastavování, si oprávněná osoba zvolí, které typy tramvají chce porovnat. Uživatel vybere pomocí pole textových řetězců s názvem *Volba masky* parametry záznamu. Parametry jsou směr, ve kterém tramvaj projížděla, počet vozů tramvaje, linka a zda má být tramvaj nízkopodlažní či nikoliv. Pokud uživatel vypíše do kteréhokoli indexu pole „all“, například do *Počet vozů*, program nerozlišuje obsah tohoto indexovaného pole při vyhodnocování. Dojde tedy k vybrání záznamů bez rozdílů, zda se jedná o záznam jedno vozové nebo dvou vozové tramvaje. Po skončení běhu programu uživatel získá informace o průměru frekvenčních spekter, rychlosti, výkonu signálu, maximální průměrné intenzitě tlaku, který působil na senzor při průjezdu tramvaje a o počtu porovnávaných tramvají.

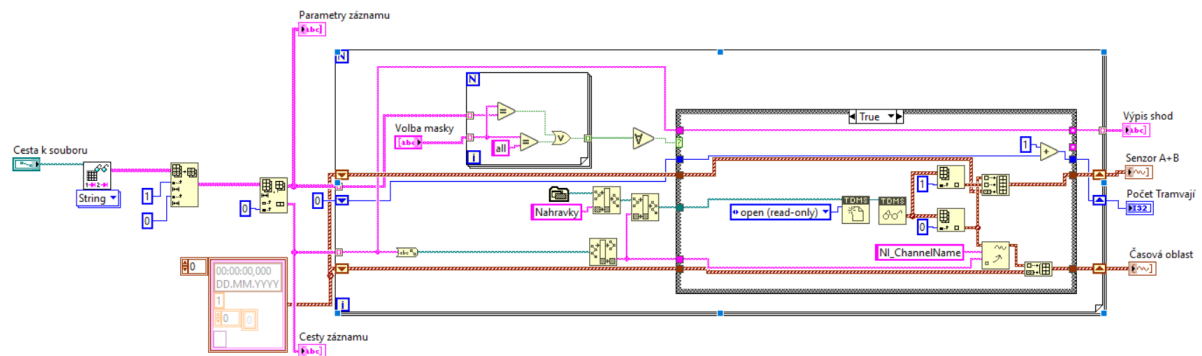


Obr. 25 Blokový diagram automatizace.

### 4.2.1 Výběr typů tramvají

V první části blokového diagramu se nachází blok s názvem *Select*. V tomto bloku dochází k vyčtení hlavičkového souboru. Všechny parametry záznamu se porovnají s volbou masky, kterou zvolil uživatel. Pokud se parametry záznamu a volba masky shodují, znamená to, že je splněna podmínka a v Case struktuře dojde k vyčtení konkrétního záznamu do paměti. Toto se díky smyčce FOR opakuje do doby, než je porovnán poslední parametr záznamu. Po porovnání posledního parametru, dojde k ukončení této smyčky. Blokový diagram je zobrazen na Obr. 26.

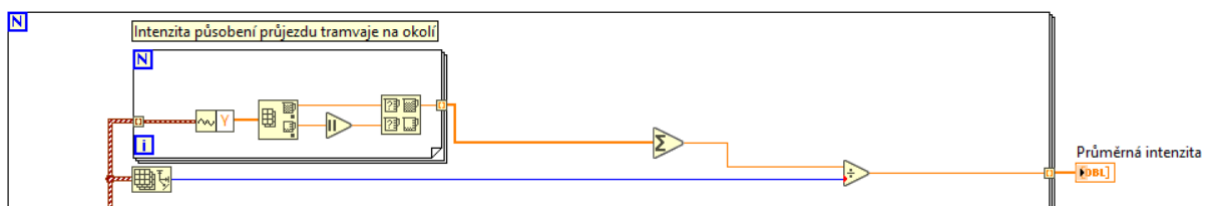




Obr. 26 Blokový diagram select.

#### 4.2.2 Intenzita působení průjezdu tramvaje na okolí

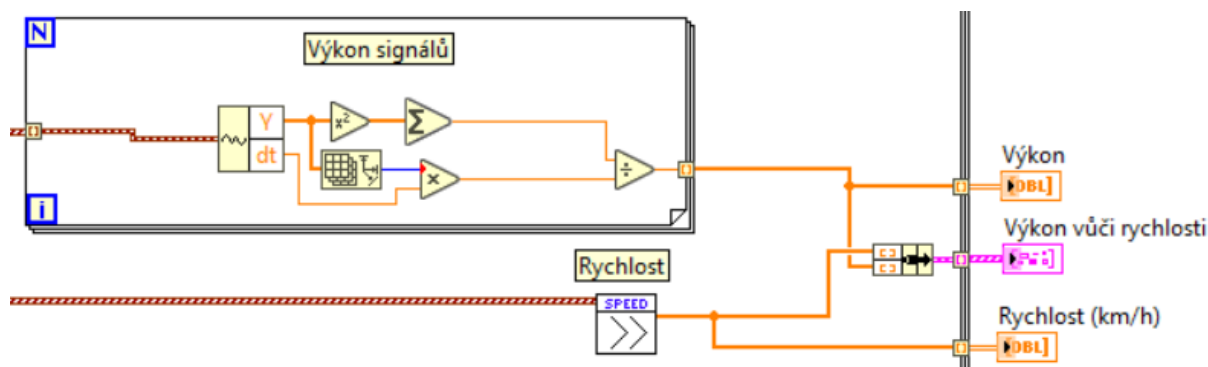
V této části kódu je zobrazen průměr maximálních hodnot tlaku, působícího na pneumatický senzor ze vzruchů šířících se do okolí při průjezdu tramvaje. Ve smyčce FOR se při každé iteraci pomocí bloku *Pole Max a Min* a bloku *Max a Min*, vybere ze všech kladných a záporných hodnot v absolutní hodnotě jedna maximální. Po skončení smyčky se vypočte suma všech hodnot a vydělí se velikostí pole, tím se získá průměrná maximální hodnota tlaku, působícího na senzor při průjezdu tramvaje, což je zřejmé z Obr. 27.



Obr. 27 Intenzita působení průjezdu tramvaje na okolí.

#### 4.2.3 Výpočet závislosti výkonu signálu na rychlosti

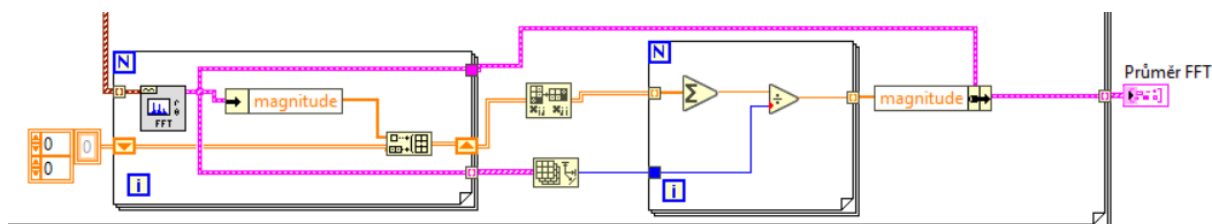
Na Obr. 28 se nachází část programu, ve které jsou porovnávány výkony signálů vůči rychlostem tramvají. Výkon je spočítán sumou energie signálu, vydělenou časem celkového záznamu. V bloku *speed* je použit výpočet rychlosti pomocí váženého průměru energie v čase, který je popsán níže viz. kapitola 6.3.2. Na konec jsou tyto hodnoty vyneseny v XY grafu *Výkon vůči rychlosti*.



Obr. 28 Porovnání výkonu signálů vůči rychlostem tramvají.

#### 4.2.4 Průměr frekvenčních spekter

V poslední části programu, která je znázorněna na Obr. 29, je zobrazení průměru frekvenčních spekter. Ve smyčce FOR jsou po jednom indexu přiváděny jednotlivé signály v časové oblasti. Pomocí bloku rychlé fourierovy transformace se převedou signály z časové oblasti do frekvenční, a jsou zapisovány do pole. Ve druhé smyčce FOR jsou sumy jednotlivých vzorků vyděleny velikostí pole. Tímto způsobem dojde ke zprůměrování všech spekter. Po skončení smyčky FOR se signály zobrazí v grafovém indikátoru *Průměr FFT*.



Obr. 29 Průměr frekvenčních spekter.

#### 4.3 Výpočet rychlosti

Jedním z parametrů, které byly analyzovány byla rychlost. Pro výpočet rychlosti byly záznamy rozděleny do samostatných souborů s délkou záznamu 15 sekund. V těchto záznamech jsou data ze všech senzorů v čase, kdy projížděla tramvaj. Pro zjištění orientačních rychlostí tramvají, byly použity naměřené rychlosti dálkoměrem YUKON. Tyto hodnoty nemohly být použity jako referenční, protože v důsledku pohybu osob tramvaje často zpomalovaly. Rychlost byla počítána použitím dvou pneumatických senzorů v přesně definované vzdálenosti. Vzdálenost mezi pneumatickým senzorem A a pneumatickým senzorem B, byla 39,2 m. Byly použity dva způsoby k výpočtu rychlosti. Prvním způsobem bylo stanovit práh citlivosti na 10 % z maximální hodnoty signálu. Druhým způsobem byl výpočet středu energie pomocí váženého průměru.

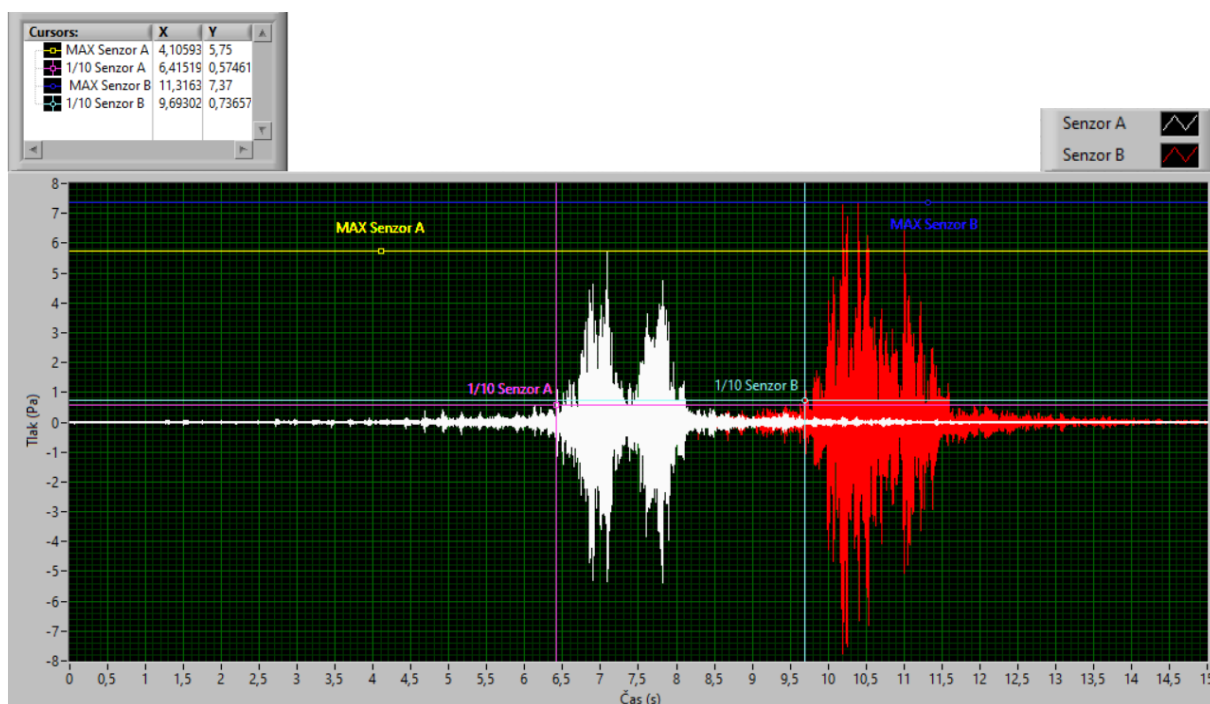


### 4.3.1 Práh

V tomto způsobu výpočtu rychlosti byl zobrazen patnácti sekundový záznam, ve kterém byly zobrazeny dva pneumatické senzory viz Obr. 30. Práh citlivosti byl nastaven na 10 % z amplitudy signálu. V čase 6,41 s dojde k překročení 10 % z maximální hodnoty signálu u prvního senzoru. U druhého senzoru dojde k překročení v čase 9,69 s. Po odečtení těchto časů dojde k získání celkového času, za který tramvaj ujela úsek 39,2 metrů (mezi senzorem A a B). Z toho je možné vypočítat rychlost, viz rovnice (5).

$$v = \frac{s}{t} \cdot 3,6 \text{ (km/hod)}, \quad (5)$$

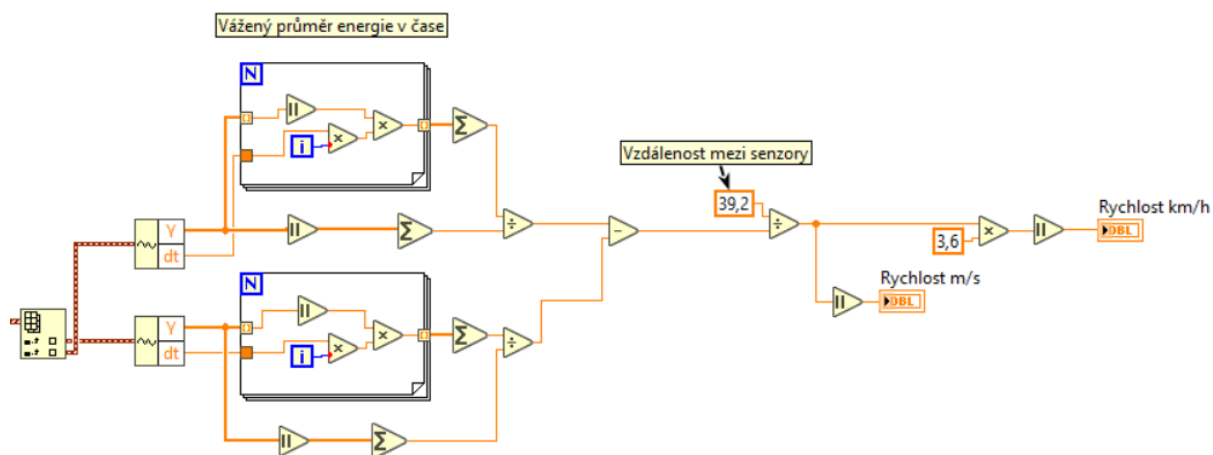
kde  $v$  je rychlost tramvajového vozidla,  $s$  je vzdálenost mezi senzory a  $t$  je čas, za který tramvaj ujela daný úsek.



Obr. 30 Časový záznam pro výpočet rychlosti pomocí prahu.

### 4.3.2 Vážený průměr energie v čase

Při výpočtu rychlosti byly oba dva signály rozděleny pomocí bloku *indexace pole*. Ve smyčce FOR se provede součin každého vzorku tlaku s každým vzorkem času. Poté se provede podíl z této sumy hodnot a sumy všech vzorků tlaků. Tímto se vypočítá střed energie daného signálu v čase. Dále se oba středy energií z obou senzorů od sebe odečtou, a tím se získá čas mezi těmito body. Na konec pomocí použití vzorce (6.1) lze vypočítat rychlost tramvajového vozidla. Tato část kódu je znázorněna na Obr. 31.



Obr. 31 Výpočet rychlosti pomocí váženého průměru energie v čase.

### 4.3.3 Výsledky rychlostí

Výsledky vypočítaných rychlostí tramvají jedoucích směrem na Karolínu jsou zobrazeny v Tab. 2. V Tab. 3 jsou výsledky vypočítaných rychlostí tramvají jedoucích směrem na Hranečník. Průměrný rozdíl výsledných rychlostí tramvají jedoucích ve směru na Karolínu, je mezi prahem a středem energie v čase 2,14 km/h. U tramvají jedoucích směrem na Hranečník je to 5,52 km/h. Celkový průměrný rozdíl mezi oběma způsoby je 3,79 km/h.

Tab. 2 Výsledky výpočtů rychlostí tramvají jedoucích směrem na Karolínu.

Označení	Směr jízdy	Číslo tramvaje	Orientační	Práh	Energie
			Rychlost km/h	Rychlost km/h	Rychlost km/h
962	Karolína	991	43	37,5	38,4
1065	Karolína	1104	33	42,9	41,6
1562	Karolína	1343	45	43,5	44
1629	Karolína	1500	40	28,9	29,4
1677	Karolína	1319	45	19,8	21,7
2138	Karolína	1346	45	48,8	51,5
2261	Karolína	1372	50	38,6	42,7
2732	Karolína	1201	57	53,9	51,6
2863	Karolína	1116	36	40,1	44,7
3338	Karolína	1209	50	48,3	50,1
3479	Karolína	1701	57	44,2	47,3
3974	Karolína		35	43,3	45,5
4074	Karolína	992	27	48,5	48,8
4548	Karolína	977	48	43,6	43,1
4667	Karolína	1116	46	21,8	27,3
5166	Karolína	998	49	40,8	42,3
27	Karolína	964	37	21,8	25,4
22	Karolína	1367	47	29	29
482	Karolína		49	36,4	38,6
607	Karolína	1344	30	20,5	24,5
1102	Karolína	1343	36	52,1	53,6

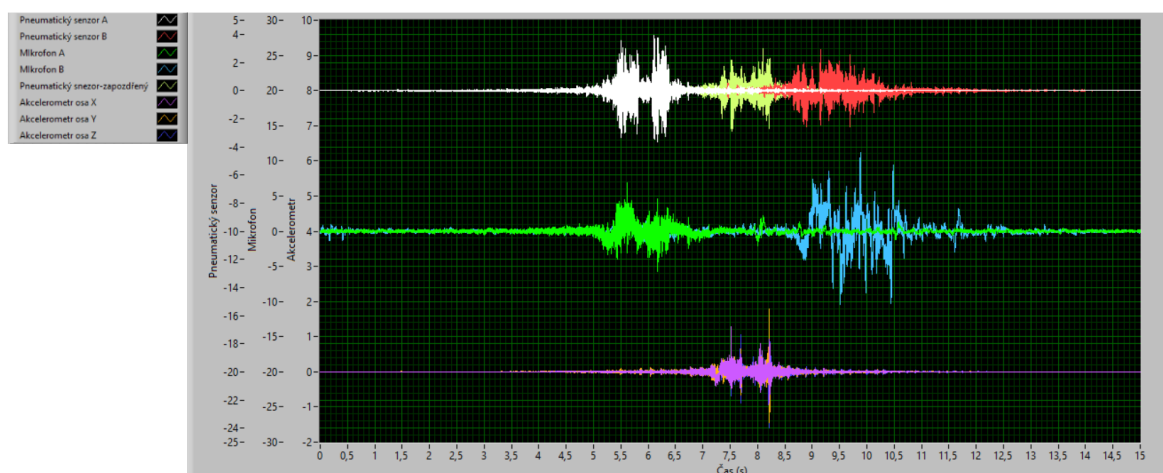
Tab. 3 Výsledky výpočtů rychlostí tramvají jedoucích směrem na Hranečník.

Označení	Směr jízdy	Číslo tramvaje	Orientační	Práh	Energie
			Rychlost km/h	Rychlost km/h	Rychlost km/h
1125	Hranečník	1500	60	55,1	63
1142	Hranečník	1204	42	48,2	51
1304	Hranečník	1372	55	52,5	56
1780	Hranečník	1209	63	49,7	60,2
1883	Hranečník	1116	59	57,5	58
2390	Hranečník	1211	50	51,3	52,4
2473	Hranečník	1116	40	53,4	58,6
2998	Hranečník	977	51	55,8	66,1
3131	Hranečník	976	51	55,6	63,6
3574	Hranečník	1204	53	50	57,4
3690	Hranečník	1352	51	48,7	46,5
4256	Hranečník	1304	59	52,4	56,7
4282	Hranečník	1002	46	49,1	51
4735	Hranečník	987	56	44,4	52,3
4930	Hranečník	1367	42	41,5	45,5
125	Hranečník	1343	50	40,1	48,2
110	Hranečník	1346	57	53,5	55,2
201	Hranečník	1343	52	58,6	56,7
693	Hranečník	1205	50	60,8	74,5
800	Hranečník	1116	53	54,5	62

#### 4.4 Časová oblast

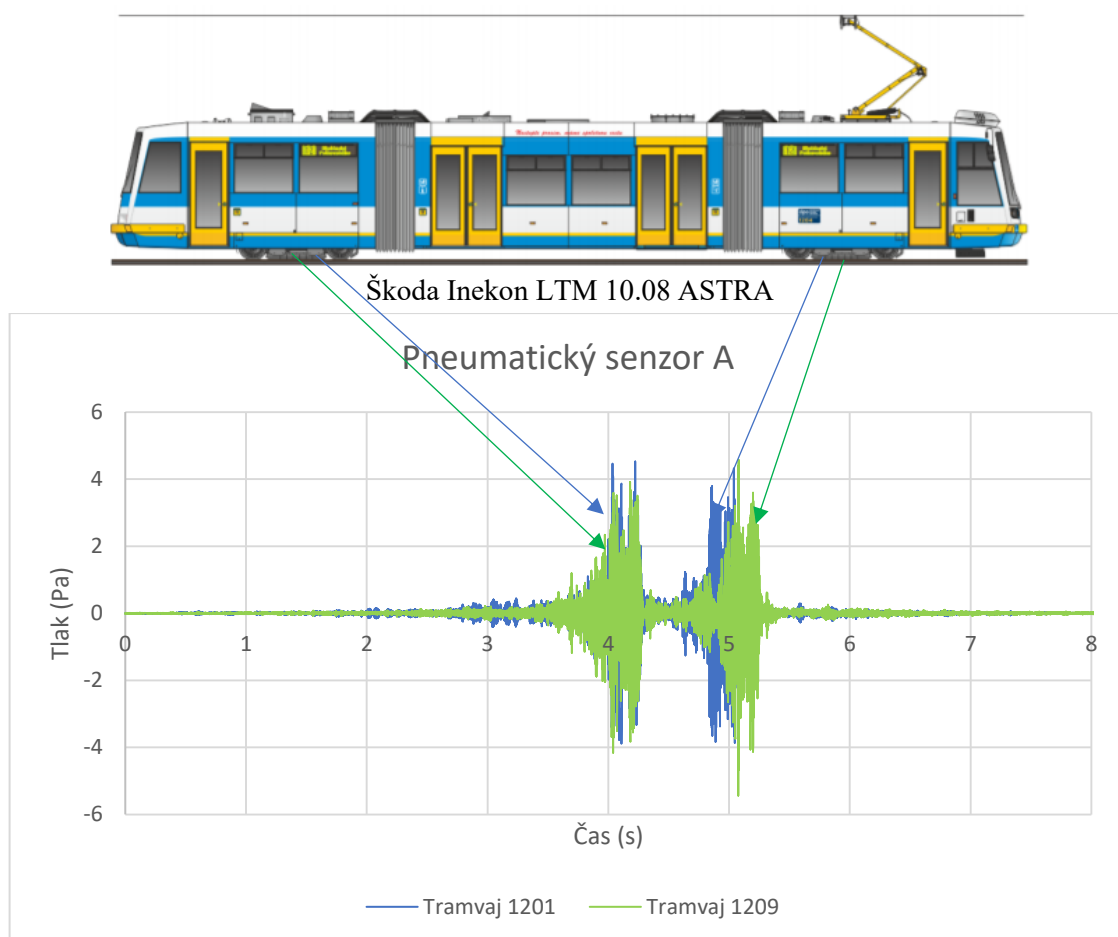
Dle experimentů bylo zjištěno, že v případě měření signálu pomocí pneumatických senzorů, přímo pod tramvajovým vozem a ve vzdálenosti 3,1 m od něj, se intenzita šířených vzruchů do okolí lišila v průměru o 82,2 %.

Na Obr. 32 je ukázka záznamu signálů v časové oblasti ze všech senzorů. Mikrofony detekovaly největší intenzitu tlaku působící na senzor při průjezdu tramvají. Tyto data se nedaly použít k výpočtu rychlosti, protože mikrofony často detekovaly rušivé vzruchy z okolí. Pneumatický senzor-zapouzdřený i akcelerometr byli schopni detekovat jednotlivé nápravy při průjezdu tramvají.



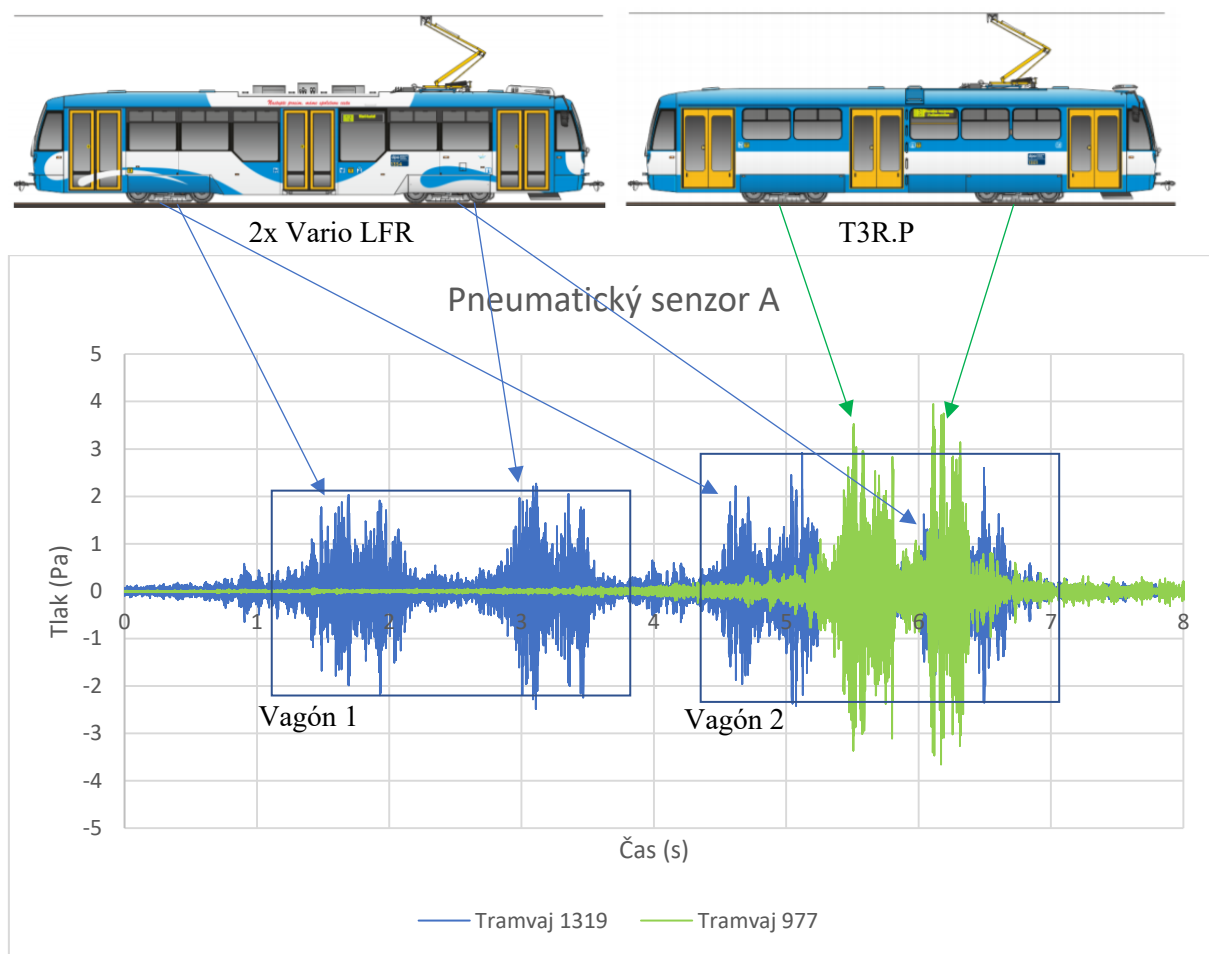
Obr. 32 Porovnání všech použitých senzorů v časové oblasti.

Na Obr. 33 jsou zobrazeny dvě tramvaje stejného typu, jedoucí ve směru na Karolínu, jedno vozové, linky 12 a nízkopodlažní. Tramvaj s evidenčním číslem 1201 jela rychlostí 52 km/h a tramvaj 1209 49 km/h. Lze vidět pouhým okem, že si jsou signály velmi podobné. Tlak při průjezdu jednotlivých náprav dosahuje u obou tramvají až 4 pascalů.



Obr. 33 Časový záznam reprezentující průjezd dvou stejných typů tramvajových vozidel.

Časový záznam dvou různých typů tramvají je zobrazen na Obr. 34. Tramvaj s evidenčním číslem 1319 je nízkopodlažní, dvou vozová tramvaj linky 4 jedoucí směrem na Karolínu. Tramvaj s evidenčním číslem 977 je ne nízkopodlažní jedno vozová tramvaj linky 12 jedoucí směrem na Karolínu. Můžeme si všimnout rozdílů ve velikosti tlaku u obou tramvají. Zatímco u tramvaje 1319 dosahuje tlak při průjezdu náprav okolo 2 Pascalů, u tramvaje 977 je tlak mezi 3 až 4 Pascaly. V době mezi projetím první a poslední nápravy jsou taky vidět jasné rozdíly. Takovéto výsledky jsou způsobeny tím, že tramvaj 1319 jela rychlostí 22 km/h a tramvaj 977 43 km/h.

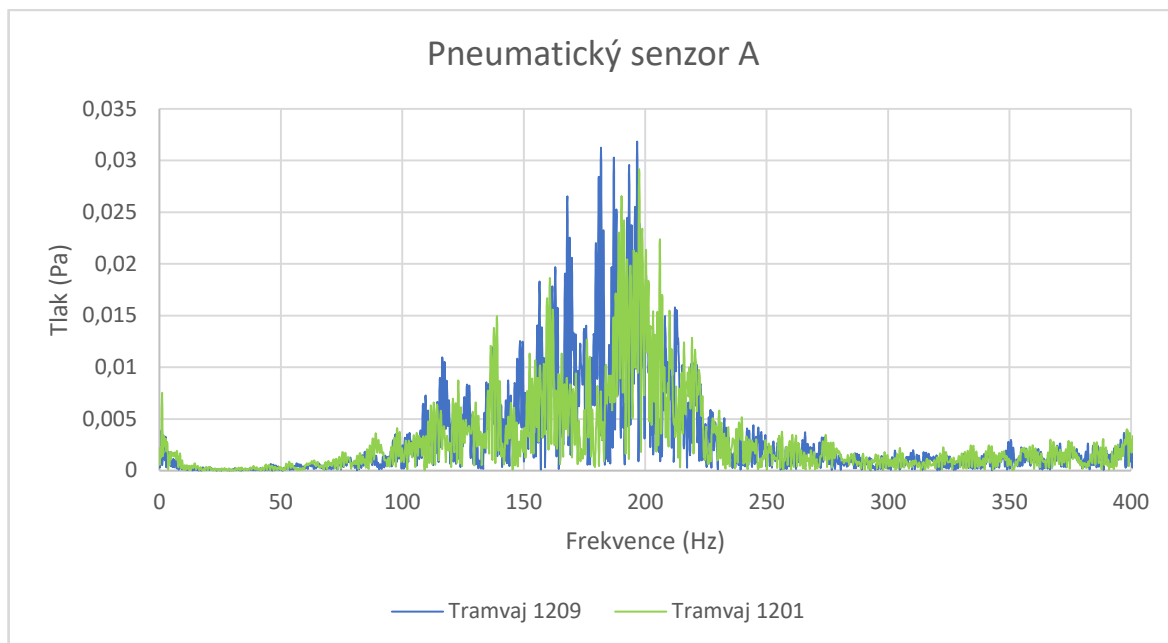


Obr. 34 Časový záznam reprezentující průjezd dvou různých typů tramvajových vozidel.

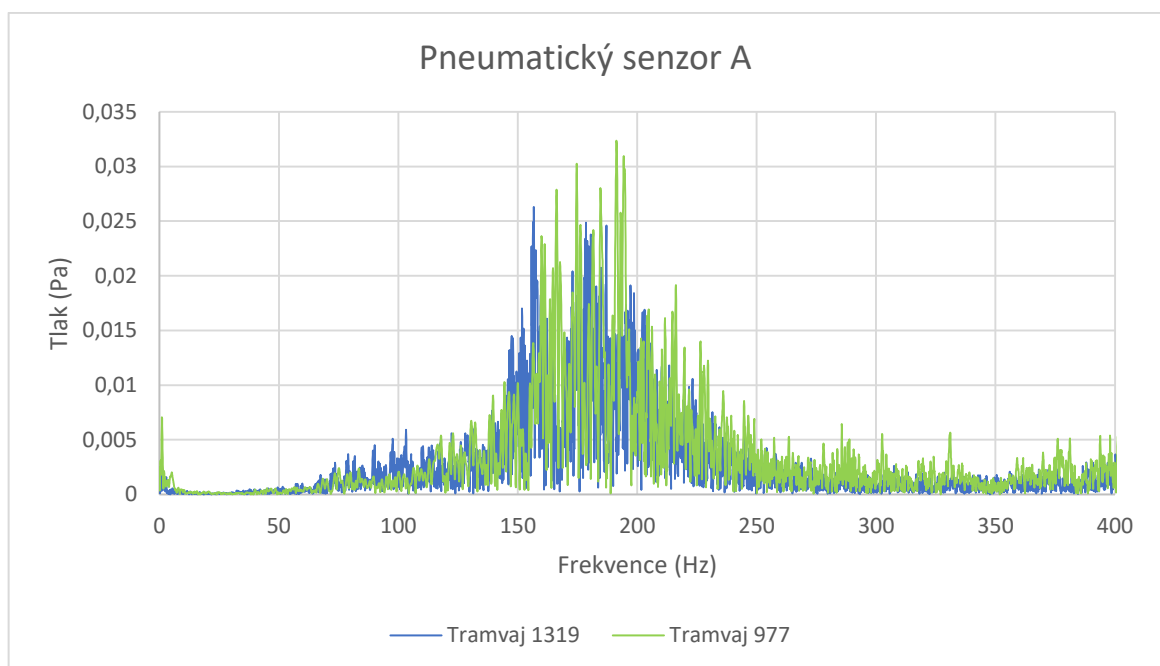
## 4.5 Frekvenční spektrum

Frekvenční spektrum dvou stejných typů tramvají lze vidět na Obr. 35. Jde vidět, že si jsou tyto průběhy velmi podobné. Liší se pouze v rozsahu charakteristických frekvencí. Tramvaj 1209 má charakteristické frekvence mezi 180–200 Hz. Tramvaj 1201 má tyto frekvence mezi 190–200 Hz.

Dva různé typy tramvají a jejich frekvenční spektra jsou znázorněny na Obr. 36. Tramvaj 1319 má charakteristické frekvence mezi 160–180 Hz. Tramvaj 977 má tyto frekvence v oblasti mezi 170–190 Hz. Intenzita v těchto frekvencích u tramvaje 977 je značně vyšší než u tramvaje 1201.

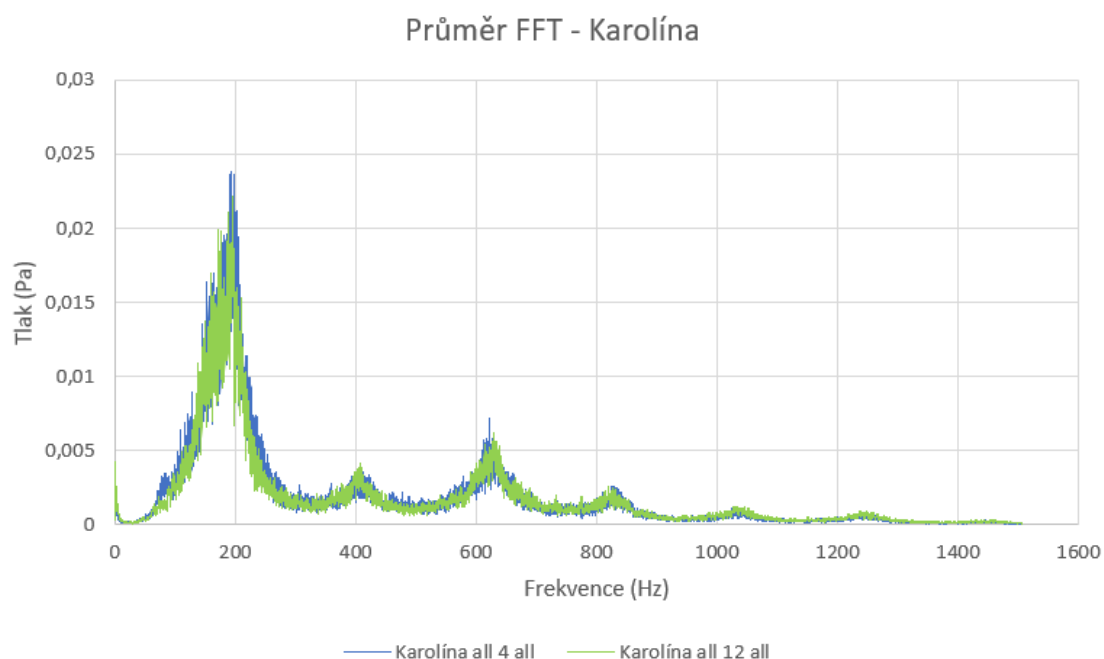


Obr. 35 Frekvenční spektrum reprezentující průjezd dvou stejných typů tramvajových vozidel.

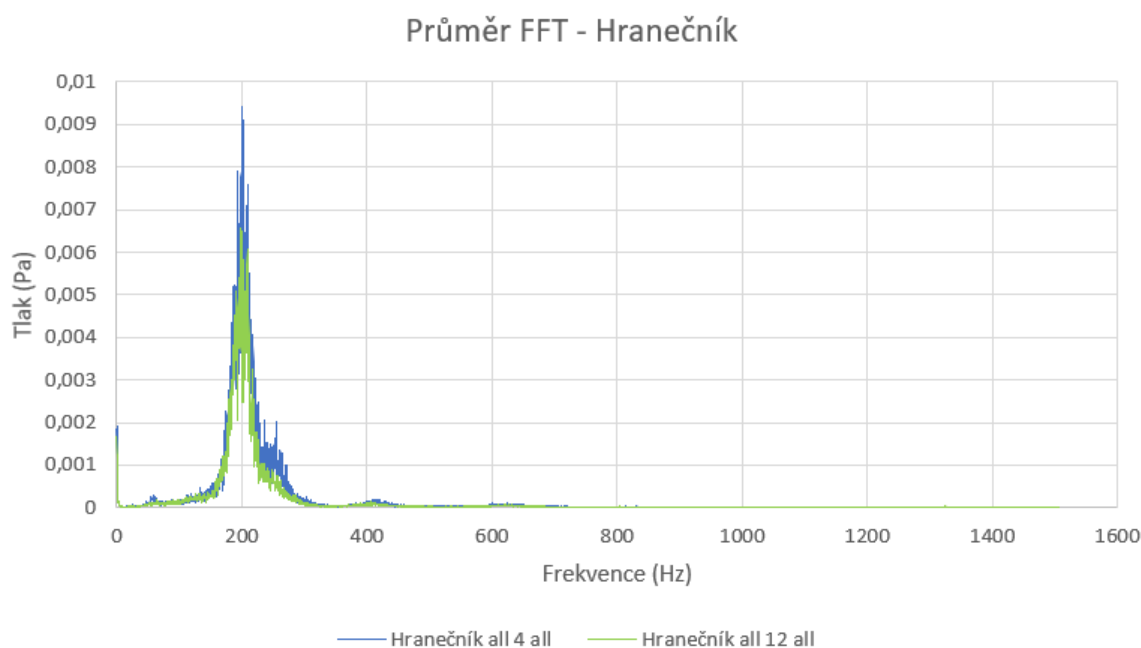


Obr. 36 Frekvenční spektrum reprezentující průjezd dvou různých typů tramvajových vozidel.

Dle měření bylo zjištěno, že na koleji ve směru na Karolínu, při stanovení prahu na 50 % maximální hodnoty signálu, měly tramvaje charakteristické frekvence mezi 145–215 Hz, což je zřejmé z Obr. 37. Ve směru na Hranečník měly tramvaje při tomto prahu charakteristické frekvence mezi 185–210 Hz, což lze vidět na Obr. 38. Při měření na bližší koleji, byly naměřeny i rušivé kmitočty. Tyto kmitočty mohly být způsobeny třeba třením železa o železo. Na vzdálenější koleji tyto rušivé kmitočty naměřeny nebyly.



Obr. 37 Průměr frekvenčních spekter-směr Karolína.



Obr. 38 Průměr frekvenčních spekter-směr Hranečník.

## 4.6 Analýza náměrů výpočtů

V této kapitole je popsán vztah mezi výkonem signálu a rychlostí, protože je zajímavé zjistit, zda u všech typů tramvají je výkon signálu větší při zvyšující se rychlosti. Dále je zde popsáno vytvoření a možné využití obálky.

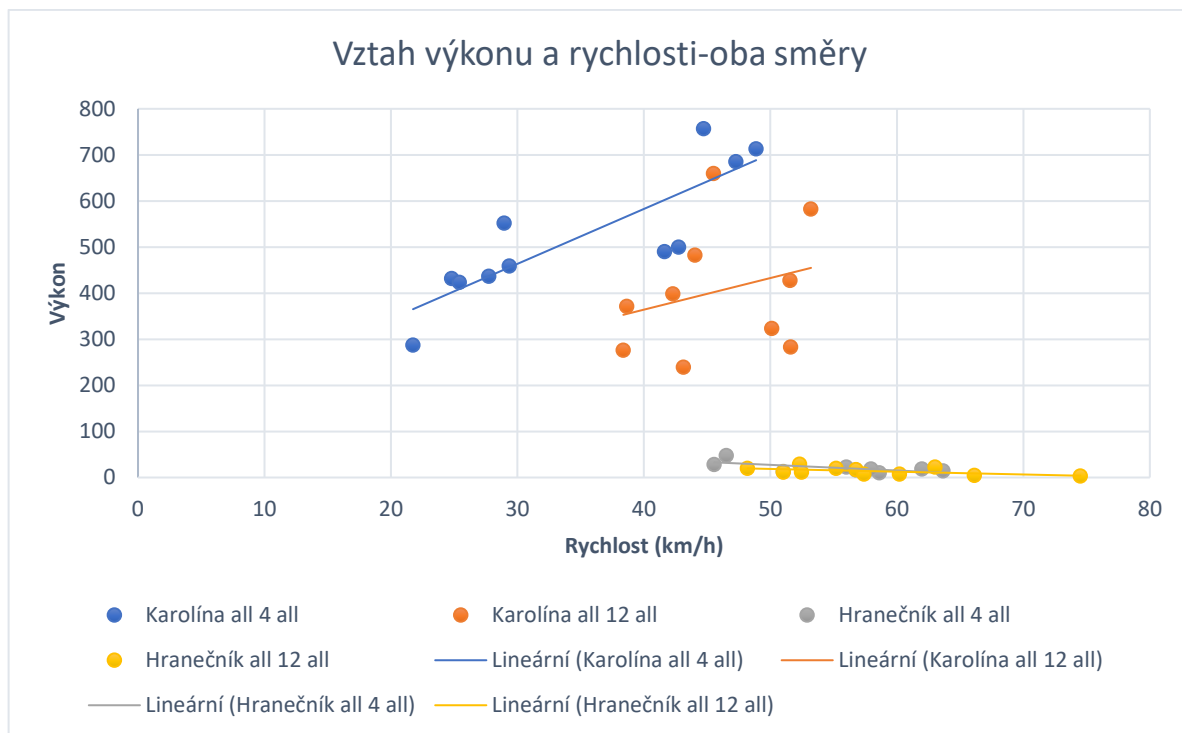
### 4.6.1 Analýza vztahu mezi výkonem a rychlostí

Tato kapitola je věnována vzájemné závislosti výkonu a rychlosti. Pro zjištění přesné závislosti mezi výkonem a rychlostí, by bylo potřeba získat statisticky významný počet dat. Ku příkladu data z celoročního měření za všech podmínek (sníh, déšť, rozdílné teploty). Kvůli malému počtu statistických vzorků nelze tyto výsledky použít s maximální přesností.

Na Obr. 39 jsou viditelné rozdíly v intenzitě výkonů signálů tramvají jedoucích na Karolínu a na Hranečník. V případě množiny dat pro tramvaj linky 4, jedoucí směrem na Karolínu, je dostatečný rozptyl hodnot rychlostí i výkonů, a tudíž je možné tyto hodnoty proložit křivkou. Křivka by mohla reprezentovat funkci závislosti rychlosti na výkonu signálu.

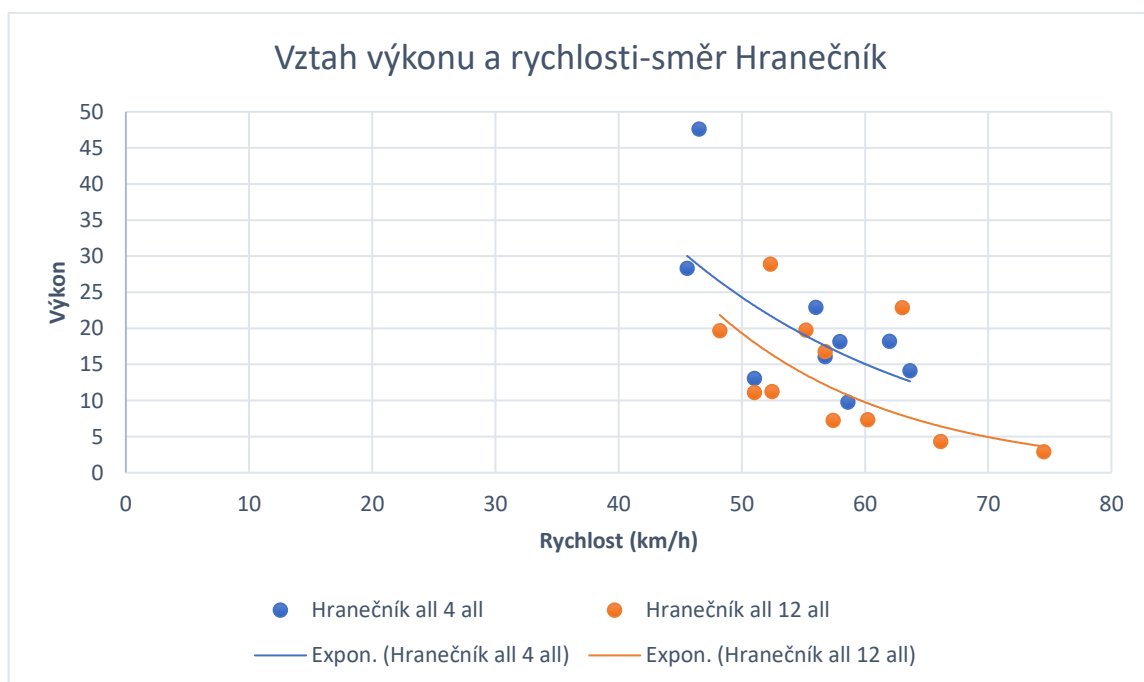
U tramvají linky 12 jedoucích ve směru na Karolínu, nebyly na první pohled výsledky statisticky významné. Po zaměření se na konkrétní typy tramvají a jejich výsledky v této analýze, však bylo možné přeci jenom něco vyvodit. U jedno vozových a nízkopodlažních tramvají s evidenčním číslem 977 a 991, mají totiž výkony nejnižší hodnoty, a to 239 a 275. Dále u dvou tramvají jedno vozových a nízkopodlažních s evidenčním číslem 1201 a 1209, byly naměřeny výkony signálů 283 a 323. Tyto tramvaje jsou typově odlišné od ostatních, jsou to totiž Škody Inekon LTM 10.08 ASTRY. Bylo by určitě zajímavé detekovat více podobných průjezdů těchto dvou výše popisovaných druhů tramvají, při větším rozsahu rychlostí.





Obr. 39 Vztah mezi výkonem a rychlostí-oba směry.

Při analýze tramvají, které jely směrem na Hranečník je vidět, že výkony signálů při zvyšujících se rychlostech, spíše klesaly. U většiny tramvají linek 4, které jsou nízkopodlažní, byly výkony signálů o něco větší než u ne nízkopodlažních. U tramvají linek 12 nebyly nalezeny podobnosti mezi jednotlivými typy. Vztah výkonu a rychlosti tramvajových vozidel, jedoucích směrem na Hranečník, je znázorněn na Obr. 40.



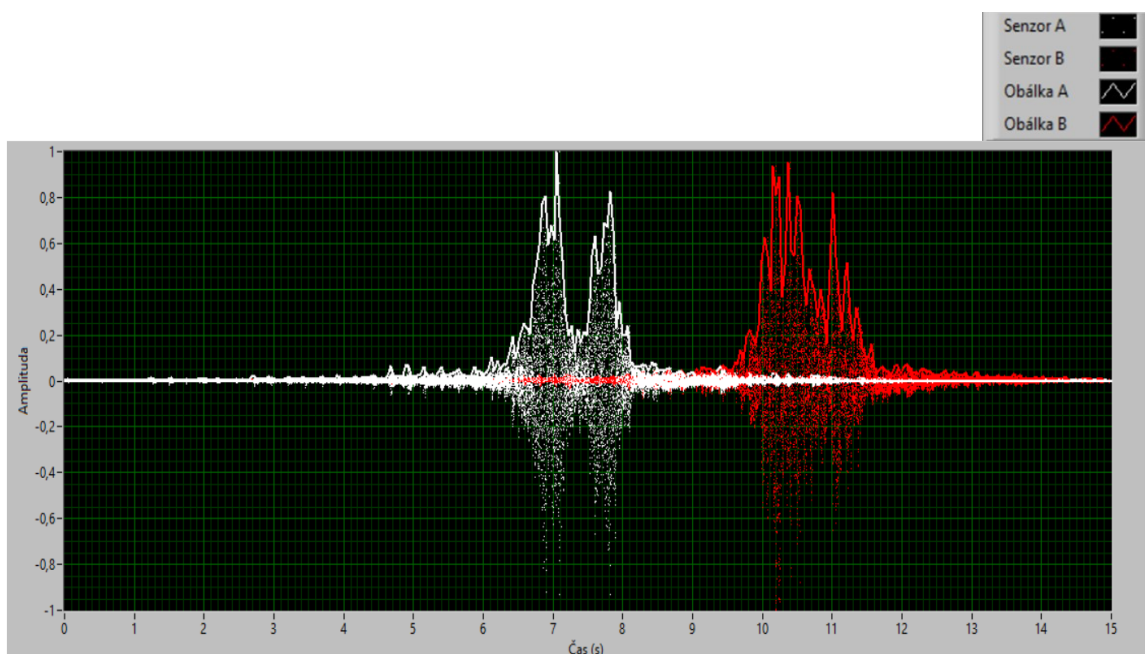
Obr. 40 Vztah mezi výkonem a rychlostí-směr Hranečník.

## 4.6.2 Analýza obálky

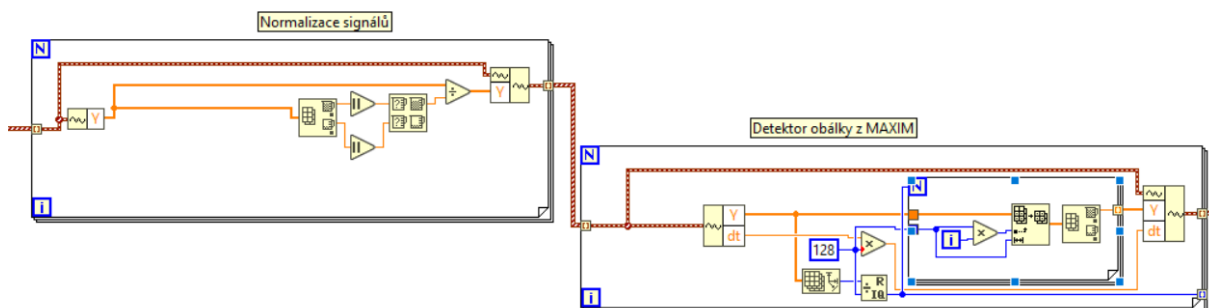
Při vytvoření obálky byly nejdříve normalizovány oba signály, takže na ose y byla vynesena bezrozměrná jednotka. Poté byl na oba signály použit detektor vrchní křivky obálky, který ze 128 po sobě jdoucích vzorků vybral maximum. Původní signál a program pro vytvoření obálky jsou zobrazeny na Obr. 41. a Obr. 42.

Tato obálka by mohla být použita k výpočtu rychlosti použitím pouze jednoho senzoru. K tomu by bylo potřeba znát délku tramvaje. Kdyby tedy byla známá délka mezi jednotlivými nápravami tramvaje, změřila by se délka trvání signálu z jednoho senzoru, a z těchto hodnot by byla vypočtena rychlost tramvaje.

K výpočtu rychlosti pomocí váženého průměru středu energie, by se takováto obálka použitím dvou senzorů dala použít také. Problém by byl v tom, že by se tímto programem zahodilo 127 vzorků a pouze jeden, tedy maximální z nich, by byl ponechán. To by mělo za důsledek, že by při výpočtu energie vznikaly nepřesnosti, čímž by byla do výpočtu rychlosti vnesena chyba.



Obr. 41 Časový záznam porovnávající původní signál s obálkou.



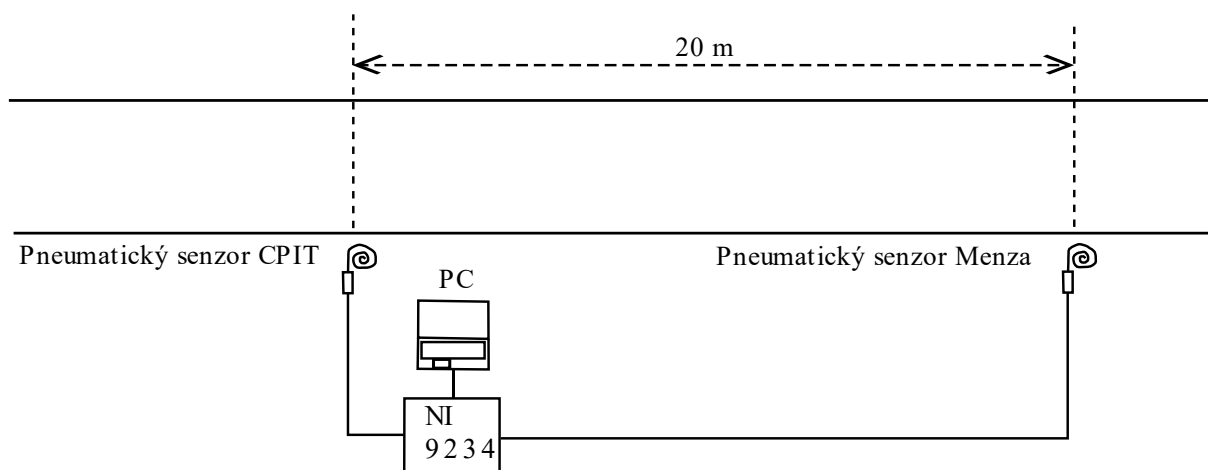
Obr. 42 Program pro vytvoření obálky.

## 5 Praktická měření detekce automobilů

Tato kapitola pojednává o výsledcích praktického měření automobilů. Při tomto experimentu byly aplikovány pneumatické senzory pro měření vzruchů šířících se do okolí z projíždějících automobilů. Měření proběhlo na parkovišti FEI, u budovy CPIT.

### 5.1 Metodika měření automobilů

Metodika měření automobilů je znázorněna na Obr. 43. Senzory byly rozmístěny ve dvou místech. První senzor byl umístěn naproti budovy CPIT. Druhý senzor byl umístěn ve vzdálenosti 20 m od prvního senzoru. Při tomto měření byl znovu využit vstupní modul pro zvuk a vibrace NI 9234, který je podrobněji popsán v kapitole 6.1.



Obr. 43 Metodika měření automobilů.

### 5.2 Výpočet rychlosti-automobily

Pro výpočet rychlosti automobilů bylo použito odečtení časů z obou senzorů, ve kterých byla hodnota signálů největší. Tudíž v časech, kdy dosáhne signál maximální hodnoty. Příklad takového výpočtu je na Obr 44. V čase 3,05 s dojde k dosažení maximální hodnoty signálu u senzoru CPIT. U druhého senzoru dojde k dosažení maximální citlivosti v čase 5,65 s. Po odečtení těchto časů se získá celkový čas, za který automobil ujel vzdálenost 20 metrů. Použitím vzorce 6.1 lze získat výslednou rychlost, která byla 27,7 km/hod.

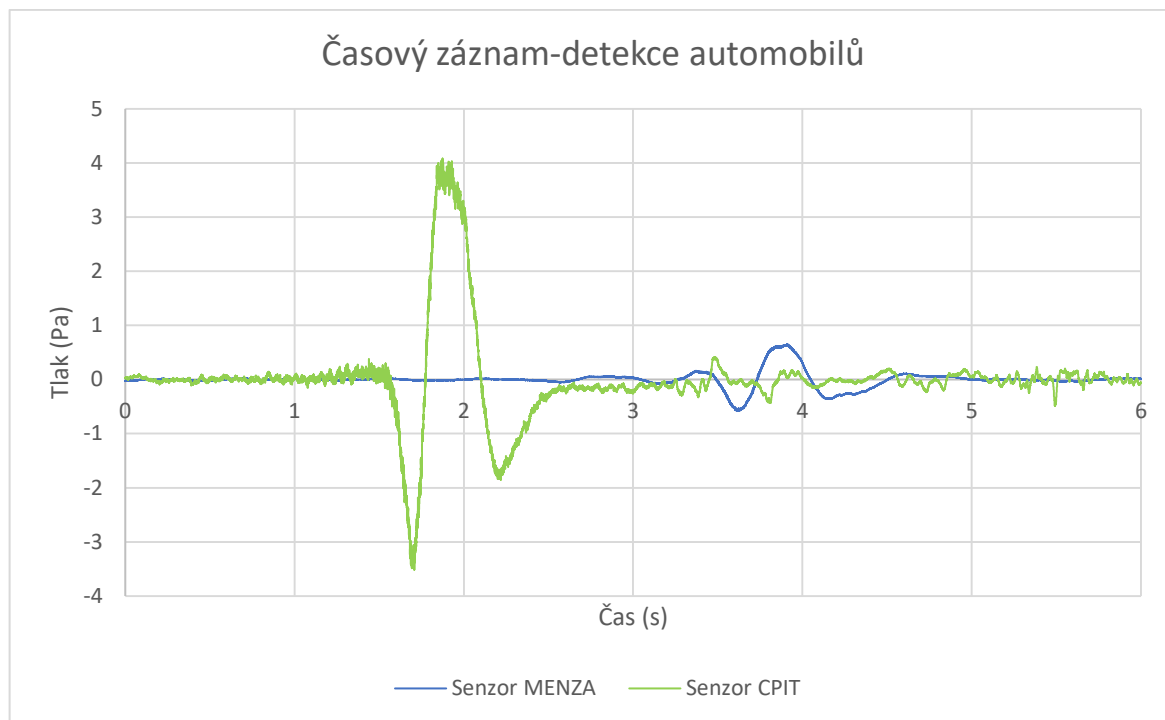


Obr. 44 Výpočet rychlostí při detekci automobilů.

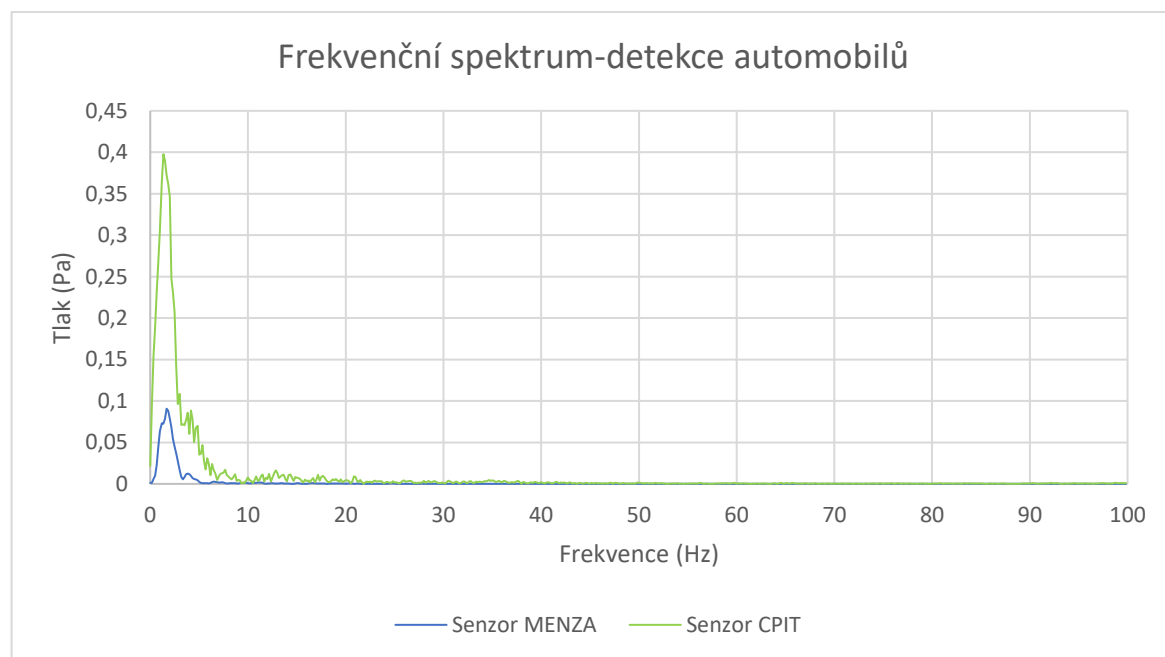
### 5.3 Časová oblast a frekvenční spektrum-automobily

Na Obr. 45 lze vidět časový záznam detekce průjezdu automobilu pomocí pneumatických senzorů. Automobil projel okolo senzoru rychlostí 35,3 km/hod. Senzor s označením MENZA měl nejspíše konstrukční nedostatky, jako například špatně utěsněnou trubici. V důsledku toho byla naměřena menší intenzita tlaku působícího na tento senzor než u senzoru s označením CPIT.

Frekvenční spektrum zobrazené na Obr. 46 znázorňuje, že spektra automobilů jsou nízko frekvenční, kde jsou charakteristické frekvence okolo 1,5 Hz.



Obr. 45 Časový záznam reprezentující průjezd automobilu.



Obr. 46 Frekvenční spektrum reprezentující průjezd automobilu.

## 6 Diskuze

Dle experimentů bylo zjištěno, že pneumatický senzor dokáže detekovat průjezdy tramvají, tím že tramvaje vytvářejí vzruchy šířící se do okolí, které na tento senzor působí. Tyto data se následně daly použít pro následné zpracování (výpočet rychlosti, průměr FFT atd.). Z těchto poznatků by se dal senzor využít i v jiných aplikačních oblastech. Zajímavým příkladem může být detekce intenzity vibrací, kde dochází k úderům, či výbuchům, jako třeba při budování tunelu, či při těžbě uhlí v dolech. Zde by mohly být senzory využity pro ochranu, před nadměrnými otřesy, které by mohly vést ke zřícení části dolu. Další možností využití pneumatických senzorů je pro potřeby Průmyslu 4.0 a SMART technologií. Nezřídka nastávají situace, kdy jsou vibrace škodlivé, například, kdy jsou zdrojem nepříjemného hluku u automatických praček. Také často ve strojírenství mohou být vibrace velmi nežádoucí, protože součástí různých druhů přístrojů a zařízení, jsou více zatíženy právě vibracemi, tudíž se rychleji opotřebovávají. Byly zaznamenány případy, kdy za zřícením mostu mohly právě nadměrné vibrace. Tedy tento pneumatický senzor dokáže najít využití i v mnoha jiných oblastech.

## 7 Závěr

Závěrem bych chtěl zhodnotit výsledky této práce. V teoretické části jsou popsány komerční systémy pro monitorování parametrů v dopravním provozu. V experimentální části v programovacím vývojovém prostředí LabView, byl vytvořen automatizovaný program pro statistické zhodnocení naměřených dat. Tento program dokáže vypočítat rychlost vozidel pomocí váženého průměru středu energie dvou senzorů v definované vzdálenosti. Dále program dokáže zobrazit signály v časové oblasti, průměr frekvenčních spekter těchto signálů, výkon signálu vůči rychlosti vozidel a taky vypočítat průměrný maximální tlak působící na senzor při průjezdu tramvaje. Pokud by byla známá délka jednotlivých tramvají, mohlo by se do programu přidat vypočtení rychlosti pomocí použití jednoho senzoru. Navrhuji v budoucnu naměřit více dat pro větší přesnost při analýze závislosti výkonu signálu na rychlosti. Výsledky by mohly být zajímavé.

Výsledky vypočítaných rychlostí se lišily od orientačního měření, protože tramvaje kvůli pohybu osob často zpomalovaly. Rozdíl vypočítaných rychlostí v obou směrech mezi výpočtem pomocí prahu a středu energie je v průměru 3,79 km/h. Ve směru na Karolínu je tento rozdíl 2,14 km/h a ve směru na Hranečník 5,52 km/h.

V časové oblasti, kdy byl měřen signál pomocí pneumatického senzoru přímo pod tramvajovým vozem, a ve vzdálenosti 3,1 m od něj, se intenzita šířených vzruchů do okolí lišila v průměru o 82,2 %.

Ve frekvenční oblasti, kdy byl práh stanoven na 50 % maximální hodnoty signálu, měly tramvaje na koleji ve směru na Karolínu charakteristické frekvence mezi 145-215 Hz. Na druhé koleji byly tyto frekvence mezi 185-210 Hz.

Při experimentu, kdy se měřily průjezdy automobilů, měly průběhy v časové oblasti hladší průběh a šlo tedy vypočítat rychlost z maximálních hodnot detekovaných signálů. Ve frekvenční oblasti byly spektra signálů nízko frekvenční.

Použité pneumatické senzory dokážou detekovat průjezdy tramvají a také jednotlivé nápravy projíždějící tramvaje. Cílem této práce bylo vytvořit nízkonákladový systém pro monitorování vybraných parametrů provozu. Jak je zřejmé z dosažených výsledků, cíl byl splněn.

## Literatura

- [1] Historické tramvaje CZ. Historie tramvajového provozu.  
Dostupné z: [http://prahamhd.vhd.cz/Tramvaje/hist\\_tram.htm](http://prahamhd.vhd.cz/Tramvaje/hist_tram.htm). 2006
- [2] Ing. Tichý J. Vztahy základních charakteristik dopravního proudu. Vysoká škola Báňská, Fakulta stavební, Katedra dopravního stavitelství.  
Dostupné z: [http://kds.vsb.cz/krivda/www-di\(vb3-dos\)/02-dopr-proud.pdf](http://kds.vsb.cz/krivda/www-di(vb3-dos)/02-dopr-proud.pdf)
- [3] Bruna, J., & JUROVÁ, M. (2008). Studie provozuschopnosti silniční sítě s využitím telematických přístupů. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta podnikatelská, Ústav managementu.
- [4] Silovská, J. (2016). Limity přístrojů určených k zaznamenávání vozidel a měření jejich rychlosti. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Ústav soudního znalectví v dopravě.  
Dostupné z: [https://k622.fd.cvut.cz/downloads/zaverecne\\_prace/DP-2016-Silovska-Jana.pdf](https://k622.fd.cvut.cz/downloads/zaverecne_prace/DP-2016-Silovska-Jana.pdf)
- [5] Minge, E., Kotzenmacher, J., & Peterson, S. (2010). Evaluation of non-intrusive technologies for traffic detection (No. MN/RC 2010-36). Saint Paul, MN: Minnesota Department of Transportation, Research Services Section.
- [6] Stanislav Kepák (2017). Nový monitor dopravního provozu na bázi optovláknového interferometru. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky.  
Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/127351/KEP019\\_FEI\\_P1807\\_2601V018\\_2017.pdf?sequence=1](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/127351/KEP019_FEI_P1807_2601V018_2017.pdf?sequence=1)
- [7] Aleš Buček & Jiří Pospíšil (2009). Technické prostředky k provádění dopravního průzkumu. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy.
- [8] Batelka M. & Vosecký S. (2011) Využitelnost civilních anti-kolizních systémů bezpilotními prostředky. Brno: Vysoké učení technické, fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.
- [9] Thingplus (2017) City Traffic & Environment Monitoring  
Dostupné z: <https://thingplus.net/en/2017/01/05/city-traffic-and-environment-monitoring/>
- [10] Vořechovský, K. & Beneš, P (2011). Měření rychlosti vozidla. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.
- [11] Bílek R. & Pospíšil J. (2013) Elektronické systémy sledování vozidel. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky.
- [12] Ladislav Balšán (2006). Preference MHD v Praze. Elektronický odborný časopis o konstrukci a provozu zdvihacích, manipulačních a transportních zařízení a dopravních prostředků.



- [13] Ondřej přibyl (2016). Neintrusivní dopravní detektory. Měření a zpracování dat (MDS). Ústav aplikované matematiky ČVUT v Praze, Fakulta dopravní.
- [14] SmarTek Systems Inc. (2008) Sensing and Systems Integration Solutions, Passive Accoustic Detector  
Dostupné z: <http://www.smarteksys.com/SASpad.html>
- [15] TAPCO – Traffic and Parking Control Co.,Inc. (2020) TC30 Ultrasonic Vehicle Presence Sensor. Dostupné z: <https://www.tapconet.com/product/tc30-ultrasonic-vehicle-presence-sensor>
- [16] SWARCO (2020) TDC3 Traffic Detectors, Non-Intrusive Traffic Detectors for Single Lane Traffic Data Acquisition. Dostupné z: <https://www.swarco.com/products/detection-sensors/traffic-counting/tdc3-traffic-detectors>
- [17] Ing. Jan Nedoma (2017) Nedestruktivní optovláknový senzorový systém pro měření rychlosti v dopravním provozu. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [18] Jan Nedoma, Marcel Fajkus, Lukas Bednarek, Vladimír Vasínek (2016) NON-Destructive Fiber-Optic Sensor System for the Measurement of Speed in Road Traffic. VŠB – Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky.
- [19] Bc. Martin Novák (2015) Popis charakteristik dopravního proudu. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky.
- [20] National Instruments (2020) USB-4431 Sound and vibration device.  
Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/support/model.usb-4431.html>
- [21] National Instruments (2020) C series sound and vibration input module.  
Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/support/model.ni-9234.html>
- [22] Binox s.r.o (2006) Dálkoměr YUKON Extend LRS-1000.  
Dostupné z: <https://www.binox.cz/dalkomery/dalkomer-yukon-extend-lrs-1000/?wdID=lc8ba2qgkrudisouj9ndibi0d0>